: https://dx.doi.org/10.22067/jgrd.2023.77871.1180
مقالهٔ پژوهشی

مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال بیستم، شمارهٔ ٤، زمستان ١٤٠١، شمارهٔ پیاپی ٤١

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی شهرستان سقز با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) در بستر GIS

آرش خداکرمی (کارشناسی مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران)
arashkhodakarami9990@gmail.com
محمود هوشیار (استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، نویسندهٔ مسئول)
hooshyar@pnu.ac.ir
عباس جاوید (کارشناسی ارشد هیدرولوژی و مدیر امور منابع آب شهرستان سقز، سقز، ایران)
javid_59@yahoo.com
سید اسعد حسینی (کارشناس هواشناسی اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران)
hosseini.asad8@gmail.com

صص ١٣٣ ـ ١٧٣

چکیده

در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت، توسعه صنعتی، برداشت بی‌رویه غیرمجاز، افزایش سطوح زیر کشت و خشکسالی، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی چندین برابر شده است. با استمرار این عمل، سطح آب‌های زیرزمینی روزبه‌روز کاهش یافته است؛ بنابراین شناسایی منابع آب زیرزمینی، استفاده بهینه و مدیریت آن به معنای برداشت پایدار و همیشگی از این منابع گران‌بها است. در این مطالعه برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز شهرستان سقز از روش تحلیل همپوشانی وزنی با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)همراه با علم سیستم اطلاعات مکانی (GIS) و دانش سنجش از دور (RS) استفاده شد. جهت پیاده‌سازی، داده‌های ٧٤٠

تاریخ دریافت: ١٤٠١/٠٧/١١ تاریخ تصویب: ١٤٠١/١٢/٠٦

حلقه چاه و ١٤ معیار زمین‌شناسی، هواشناسی، توپوگرافی، هیدرولوژی و محیطی در بستر GIS برای تولید نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی تهیه و پردازش شد. با استفاده از منحنی عملکرد سیستم (ROC) برای صحت‌سنجی نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی برآوردشده با تجزیه و تحلیل توزیع‌سازی از چاه‌های باز موجود، مقدار AUC = ٪۸۳,۷ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل مورد بررسی با موفقیت آب‌های زیرزمینی را پیش‌بینی کرده است. تجزیه و تحلیل‌های آماری نیز نشان داد، ۸/۷ درصد و ۱۸/۵ درصد از کل مساحت شهرستان سقز به ترتیب در منطقه با پتانسیل بسیار خوب و خوب، ۳۱/۵ درصد در پتانسیل متوسط، ۳٤/۳ درصد به‌ترتیب در منطقه با پتانسیل ضعیف و ۷ درصد نیز در منطقه با پتانسیل بسیار ضعیف قرار دارند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی کمک کند.

کلیدواژه‌ها: پتانسیل منابع آب زیرزمینی (GWPZ)، تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)، سقز، منطق فازی.

۱. مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از ضروری‌ترین منابع طبیعت است که در فضاهای منفذی و شکستگی‌های سنگ و رسوبات زیر سطح زمین شکل می‌گیرد (نقیبی و همکاران، ۲۰۱۵). حدود ۳۰ درصد از آب شیرین جهان به‌عنوان آب‌های زیرزمینی پنهان و ذخیره‌شده است؛ درحالی‌که آب‌های سطحی تنها ۰/۳ درصد به شکل دریاچه‌ها، مرداب‌ها، مخازن و رودخانه‌ها را تشکیل می‌دهند (سنانایک[1] و همکاران، ۲۰۱٦). بزرگ‌ترین منبع آب شیرین روی زمین آب‌های زیرزمینی است (ساگانتی[2] و همکاران، ۲۰۱۳) و به دلیل عواملی مانند دستیابی زیاد، کیفیت بسیار عالی و هزینه کم توسعه (لی و همکاران، ۲۰۱۲)، دمای ثابت، ضریب آلودگی کمتر، آسیب‌پذیری محدود، سطح اطمینان بیشتر و شیرین بودن و ترکیبات ثابت شیمیایی، یک منبع قابل‌اتکا به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (مناب و نپاک[3]، ۲۰۱۲).

1. Senanayake
2. Suganthi
3. Manab & Nepak

تأثیر فعالیت‌های انسانی و رشد سریع جمعیت به تقاضای بیشتر برای آب منجر شده است و این آب‌ها خیلی سریع در حال افت کردن هستند (دنگ[1] و همکاران، ۲۰۱۶). کشور ایران سرزمینی خشک و نیمه‌خشک با نزولات جوی بسیار اندک است؛ به‌طوری‌که میانگین بارش سالیانه آن کمتر از یک‌سوم متوسط بارندگی سالیانه جهان است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۶؛ علیزاده، ۱۳۹۸)؛ در نتیجه استخراج آب‌های زیرزمینی به یکی از اجزای مهم مدیریت و برنامه‌ریزی آب به‌ویژه در مناطق روستایی تبدیل شده است (داس و پاردشی[2]، ۲۰۱۸). حیاتی‌ترین بخش مدیریت منابع آب زیرزمینی، تعیین پتانسیل آب زیرزمینی است. تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی برای استفاده پایدار از منابع و توسعه بیشتر سیستم آبیاری بسیار مهم است (پاتک[3]، ۲۰۱۷). بهره‌برداری‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در حال افزایش است؛ بنابراین افت کمّی و کیفی این منابع به‌عنوان یکی از شاخصه‌های مهم تخریب اراضی محسوب می‌شود و یکی از راهکارهای مؤثر و مفید اجرای پروژه‌های مختلف آبخیزداری است (کردوانی و همکاران، ۱۳۹۱). در چنین شرایطی برآورد پتانسیل آب زیرزمینی در یک منطقه به مردم کمک خواهد کرد که درک عمومی از منابع آب محلی داشته باشند و می‌تواند هنگام تصمیم‌گیری درمورد انتخاب منطقه، برنامه‌ریزی شهری، حفاظت از محیط‌زیست و... آن‌ها را راهنمایی کند (دنگ[4] و همکاران، ۲۰۱۶). شکل‌گیری آب‌های زیرزمینی در هر مکانی نتیجه تعامل بین عوامل زمین‌شناسی، هیدرولوژی، هوا و زیست‌شناسی است (داس، ۲۰۱۹)؛ بدین صورت که تغییرات سنگ‌شناسی، الگوی بارندگی، شیب، گسل، خطواره‌ها، کاربری اراضی، بافت خاک، وضعیت توپوگرافی و بسیاری موارد دیگر حرکت آب‌های زیرزمینی را از طریق منافذ خاک شناسایی می‌کنند (مالیک[5] و همکاران، ۲۰۱۴؛ اوه[6]، ۲۰۱۱؛ داس، ۲۰۱۱). ادغام سیستم اطلاعات مکانی (GIS)[7] و سنجش از دور (RS)[8] برای

1. Deng
2. Das & Pardishi
3. Pathak
4. Deng
5. Mallick
6. Oh
7. Geospatial Information System
8. Remote Sensing

اکتشاف آب‌های زیرزمینی و مطالعات آن‌که تغییر پارادایم در تحقیقات آب‌های زیرزمینی است، به ارزیابی، پایش و حفظ منابع آب زیرزمینی کمک می‌کند (سیلوا و پاتک، ۲۰۱۸). شناسایی سایت‌های آب‌های زیرزمینی با منابع آب فراوان کار ساده‌ای نیست. روش‌های مرسوم مانند حفاری، هیدروژئولوژی، زمین‌شناسی، بررسی‌های میدانی و روش‌های ژئوفیزیکی، مستلزم کار گسترده در فعالیت‌های اکتشافی است که از نظر هزینه، زمان و منابع پرهزینه است. در تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره یکپارچه[1] (MCDM) از تکنیک‌های اطلاعات جغرافیایی برای شناسایی منابع آب‌های زیرزمینی و سایت‌های تغذیه مصنوعی استفاده می‌شود (سینگ و همکاران[2]، ۲۰۱۷). بر این اساس در دهه‌های اخیر به‌طور گسترده، فرایند تحلیل سلسله مراتبی[3] (AHP) برای MCDM به کار رفته و با موفقیت در نقشه‌برداری منطقه پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شده است (اوما و تاتیشی[4]، ۲۰۱٤؛ کالیرج[5] و همکاران، ۲۰۱٤؛ رحمان و همکاران، ۲۰۱٤؛ مالیک و همکاران، ۲۰۱۵). بااین‌حال، به‌رغم محبوبیت AHP، گاهی اوقات به این روش به‌دلیل ناتوانی در مقابله کافی با عدم قطعیت‌ها و نبود دقت مرتبط با نگاشت ادراک یک تصمیم‌گیرنده به اعداد واضح، انتقاد می‌شود (چن[6] و همکاران، ۲۰۱۱).

علاوه بر این، روش AHP برای MCDM در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای نقشه‌برداری پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شده است (هسیه[7] و همکاران، ۲۰۰٤؛ مالیک و همکاران، ۲۰۱۵؛ رحمتی و همکاران، ۲۰۱۵؛ ماچیوال[8] و همکاران، ۲۰۱۱). فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به‌دلیل انعطاف‌پذیری توابع عضویت فازی، به بهبود دقت نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی منجر می‌شود؛ بر این اساس، در پژوهش حاضر رویکرد یکپارچه RS و GIS با

1. Multiple Criteria Decision Making
2. Singh
3. Analytical Hierarchy Process
4. Ouma andTateishi
5. Kaliraj
6. Chen
7. Hsieh
8. Machiwal

فازی AHP برای توسعه لایه‌های داده موضوعی برای ترسیم نقشه پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی[1] (GWPZ) در شهرستان سقز مورد بررسی قرار گرفت.

۲. پیشینهٔ تحقیق

مطالعات مختلفی در داخل و خارج از کشور در زمینه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی انجام شده است. در این راستا، الویس[2] و همکاران (۲۰۲۲) با ادغام تکنیک فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، نظریه نسبت فرکانس همراه با GIS و RS برای پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی، ۱۳ معیار مؤثر در آب زیرزمینی شامل معیارهای زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، بافت خاک، غلظت خط‌خطی، تراکم زهکشی، تراکم گسل، شیب منطقه‌ای، توزیع بارندگی، انحنای سطح و مقطع، ارتفاع، کاربری اراضی و شاخص رطوبت خاک را انتخاب و در مدل‌سازی به کار گرفتند. تجزیه و تحلیل نشان داد، مقدار AUC در مدل AHP برابر با ۷۹/۵ درصد بهتر از مدل FR با AUC برابر با ٧٤/٦ درصد عمل می‌کند. ساجیل[3] و همکاران (۲۰۲۲) برای پیش‌بینی مناطق بالقوه آب زیرزمینی در حوضه رودخانه چنای از تکنیک AHP استفاده کردند. برای دستیابی به این هدف، ۱۱ معیار مؤثر در آب زیرزمینی شامل معیارهای زاویه شیب، جهت شیب، تراز آب‌های زیرزمینی، بارندگی، زمین‌شناسی، تراکم آبراهه‌ها، بافت خاک، کاربری اراضی، تراکم خطواره‌ها، ژئومورفولوژی، ضخامت سنگ‌بستر استخراج شد. تجزیه و تحلیل نشان داد، بیش از ۷۸ درصد از داده‌های میدانی با نقشه پیش‌بینی‌شده در مطالعه مطابقت دارد. رادولوویچ[4] و همکاران (۲۰۲۲) از GIS و تکنیک‌های AHP فازی در شمال صربستان برای ترسیم مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی استفاده کردند. بدین منظور از شش عامل مؤثر بر منابع آب زیرزمینی شامل عوامل زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، کاربری و پوشش زمین، تراکم زهکشی رودخانه‌ها، جنس خاک و زاویه شیب استفاده شد. نتایج نشان داد، مقدار AUC در مدل AHP برابر با ۷۷ درصد است. طرابلسی[5] و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از

1. Ground Water Potential Zone
2. Elvis
3. Sajil
4. Radulović
5. Trabelsi

فرایند سلسله‌مراتبی و مدل آماری نسبت فرکانس[1] (FR) در نقشه پهنه پتانسیل آب زیرزمینی- پینگ با استفاده از GIS در حوضه آبخیز مدجردا[2] در تونس، ۱۸ عامل مرتبط با آب‌های زیرزمینی شامل تجزیه و تحلیل روابط فضایی بین قابلیت انتقال و عوامل مختلف شرایط هیدرولوژیکی مانند ارتفاع، شیب، انحنا، رودخانه، خطواره، زمین‌شناسی، خاک، بارندگی و کاربری زمین، جمع‌آوری و استخراج کردند. چلیک[3] (۲۰۱۹) به پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی با کمک تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر GIS برای پیش‌بینی فضایی در رودخانه دجله، زیر حوضه بتمن-حسانکیف، ترکیه پرداخت. درنهایت نقشه‌های پتانسیل آب‌های زیرزمینی[4] (GWPZ) را در پنج طبقه تهیه کرد. رنجبری و همکاران (۱۳۹۷) برای دستیابی به پتانسیل آب زیرزمینی، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، سنجش از دور (RS) و تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای محاسبه اهمیت نسبی پارامتر موضوعی استفاده کردند. نتایج نشان داد، سنگ‌های آهکی پتانسیل خوبی برای منابع آب زیرزمینی دارند.

با بررسی پیشینه تحقیق می‌توان بیان کرد، سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات مکانی (GIS) ابزارهای توانمندی در بررسی و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی عستند که در این تحقیق قابلیت‌های آن‌ها برای ارزیابی و مدیریت پتانسیل آب زیرزمینی در شهرستان سقز به کار گرفته شد.

۳. روش‌شناسی تحقیق

مراحل انجام پژوهش متشکل از پنج مرحله اساسی است که عبارت است از: جمع‌آوری چاه‌های آزمایش پمپاژ شده در محدوده مطالعاتی به‌عنوان متغیرهای وابسته، استخراج معیارهای زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هواشناسی، توپوگرافی و محیطی مؤثر بر پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی به‌عنوان متغیرهای مستقل، تعیین میزان اهمیت معیارها براساس پرسشنامه دریافت‌شده از کارشناسان مرتبط در حوضه منابع آب، فازی‌سازی و محاسبه وزن‌های نرمال‌شده و درنهایت، ارزیابی و اعتبار سنجی مدل فرایند سلسله‌مراتبی فازی با استفاده از

1. Frequency ration
2. Medjerda
3. Celik
4. Ground Water Potential Zone

منحنـی ROC. تمـامی پردازش‌هـای پـژوهش توسـط نرم‌افزارهـای ArcGIS pro، QGis، Google Earth Engine، ENVI، SPSS انجام شـد و بـرای تهیـه ماتریس‌هـا از نرم‌افـزار MATLAB استفاده شد.

۳. ۱. منطقهٔ موردمطالعه

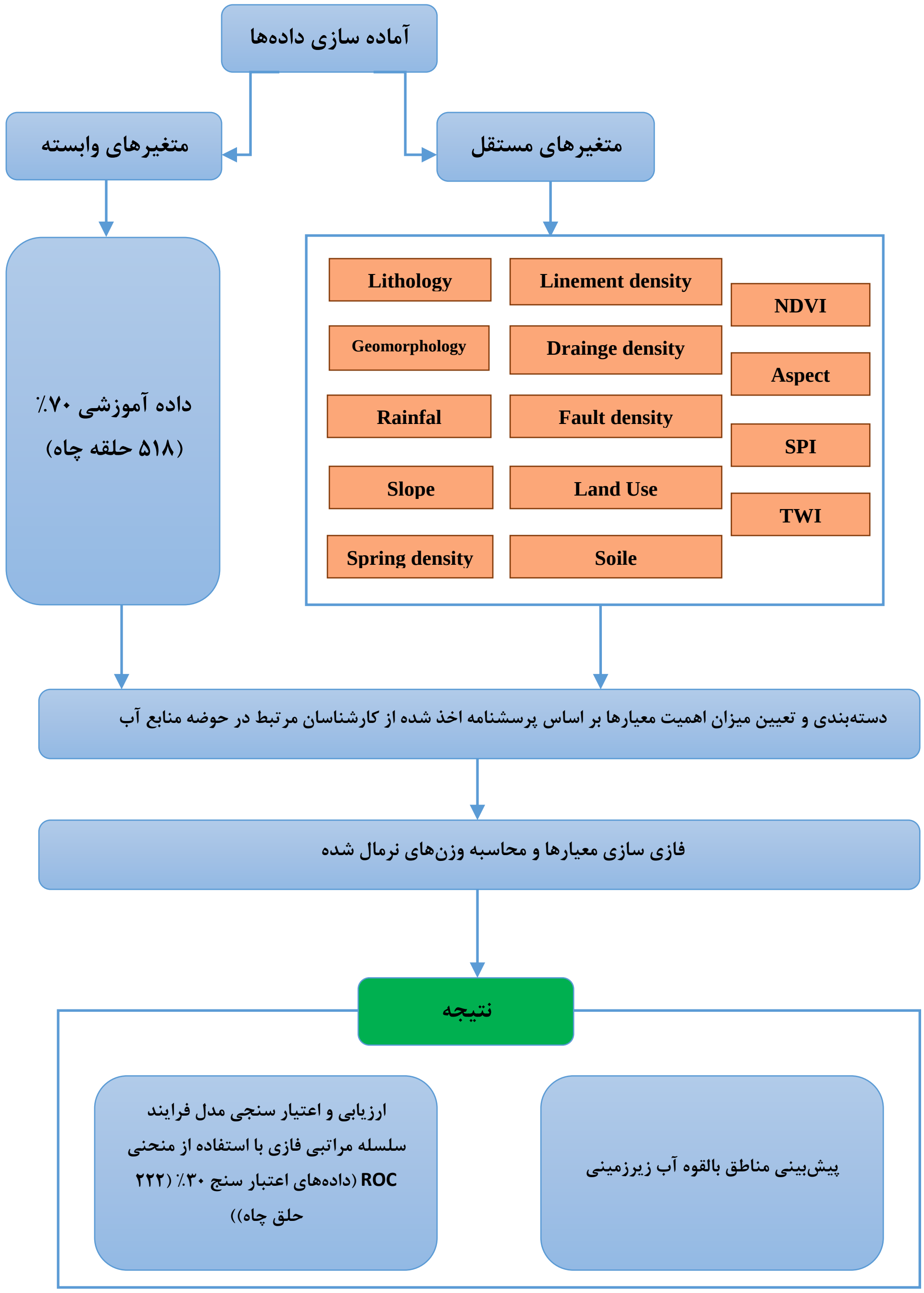
محدوده مطالعاتی پژوهش، شهرستان سقز واقع در استان کردسـتان اسـت. حوضـه آبریـز محدوده مطالعاتی سقز جزو حوضه آبریـز دریاچـه ارومیـه اسـت و دارای وسـعت ۵۳۰۹/۱۲ کیلومترمربع است. شهرستان سقز با مساحتی معادل ٤٥٠٠ کیلومترمربع و بین ۳۵ درجـه و ٤٦ دقیقه تا ۳٦ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ٤٥ درجه و ٥٥ دقیقه تا ٤٦ درجـه و ٥٥ دقیقـه طول شرقی قرار دارد (حسینی و همکاران، ١٤٠٠). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعـه در شکل (۱) آورده شده است.

۳. ۲. عوامل مؤثر در پتانسیل آب‌های منابع زیرزمینی

در این مطالعه از ١٤ معیار زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هواشناسی، توپوگرافی و محیطـی که شامل سنگ‌شناسی[۱]، ژئومورفولوژی[۲]، بارندگی[۳]، زاویه شیب[۴]، تـراکم چشـمه‌هـا[۵]، تـراکم خطواره‌ها[۶]، تراکم زهکشی رودخانه‌ها[۷]، تراکم گسـل‌هـا[۸]، کـاربری اراضـی[۹]، بافـت خـاک[۱۰]، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی[۱۱](NDVI)، شاخص موقعیت توپوگرافی[۱۲] (TPI)، شاخص توان آبراهه[۱۳] (SPI) و شاخص رطوبت توپوگرافی[۱۴](TWI) برای پتانسیل‌یابی منـابع آب زیرزمینی استفاده شده است.

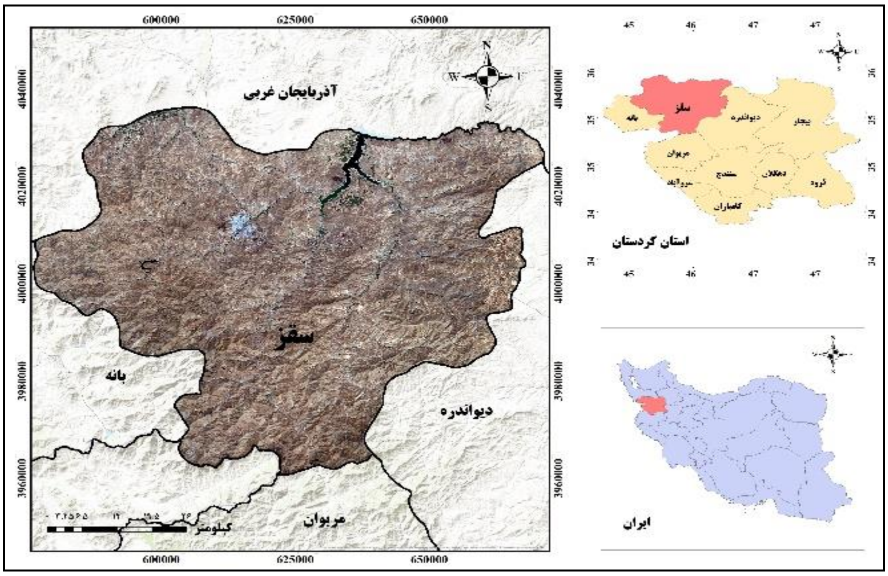
---

1. Lithology
2. Geomorphology
3. Rainfall
4. Slope
5. Spring density
6. Lineament density
7. Drainage density of Rivers
8. Fault density
9. Land use
10. Soil textute
11. Normalized Difference Vegetation Index
12. Topographic Position Index
13. Stream Power Index
14. Topographic Wetness Index



شکل ۱. نمودار فرایند انجام پژوهش

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۱



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه در کشور و استان کردستان

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۱

تمامی این ۱٤ معیار از طریق یک پرسشنامه در زمینه مهندسی هیدروژئولوژی، منابع آب و زمین‌شناسی که به‌صراحت طراحی شده بود، بررسی شد. همچنین با ۱۰ کارشناس خبره (شش کارشناس ارشد منابع آب و متخصصین هیدروژئولوژیست، سه کارشناس زمین‌شناسی و یک کارشناس معادن) شاغل در شرکت آب منطقه‌ای کردستان مصاحبه شد تا نظرات آن‌ها درمورد اهمیت نسبی متغیرهای هیدرولوژیک مؤثر بر وقوع آب‌های زیرزمینی به دست آید. روشن است که بهترین راه شناخت محدوده‌های مطالعاتی و اطمینان از اطلاعات موجود، بازدید میدانی، ثبت مشاهده‌ها و تغییرات جدید و مقایسه آن‌ها با تحقیقات پیشین در نواحی آبرفتی است (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۵؛ مالیک و همکاران، ۲۰۱۵؛ چن و همکاران، ۲۰۲۰). نقشه سنگ‌شناسی محدوده مطالعاتی با استفاده از نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی کشور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. سنگ‌شناسی به‌دلیل تأثیر سازندهای زمین‌شناسی با بافت‌ها، درجه خلوص سنگ‌ها در تخلخل، نفوذپذیری اولیه و تمرکز جریان‌های آب زیرزمینی در داخل سنگ‌ها، بر تغذیه آب زیرزمینی بسیار مؤثر است (هلدر[1] و همکاران، ۲۰۲۰).

1. Halder

جدول ۱. دسته‌بندی سنگ‌شناسی و رتبه‌های اختصاص داده‌شده به هر دسته

مأخذ: موخرجی[1] و همکاران، ۲۰۱۲

دسته	آبرفت‌های مسیر رودخانه	سنگ آهک	رسوبات آواری عهد حاضر	دولومیت	سنگ آهک مارنی	ماسه‌سنگ، کنگلومرا	سنگ‌های آتش‌فشانی و آذرین	سنگ‌های دگرگونی، شیل، مارن و رس
رتبه	۱	۲	۳	۳/۵	٤	٥	٦	۷
واحد زمین‌شناسی	Qal	J_d,Oml	Kps,Qt2,Qtl	pe^{ry},Es,Eb,Kmd	Em,Pr^{ld}, Pr^{s}	Ez,El,Esc,Omc	G3, G2, G1,di,gd,md	Mt^{gr-gn},Mt^{gn-sch}, Mt^{sch},Mt^{ry},Mt^{v},Mt^{phy},Pe^{sh}k,J_s,J_v,J_q,Ksh,Ksl,Kmb

بررسی‌ها نشان داد مهم‌ترین سازندهای رخنمون‌یافته در حوضه آبریز مورد مطالعه شامل واحدهای کربناته آواری پرکامبرین-کامبرین زیرین پالئوزوئیک و مزوزوئیک دارای تشابه ساختاری با زون البرز-آذربایجان می‌شود و سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین این منطقه جزو زون سنندج-سیرجان است.

نقشه‌های ژئومورفولوژی، نقشه‌های توپوگرافی هستند که مناطق کوهستانی، پست، تپه‌ماهور و آبرفتی منطقه را نشان می‌دهند. مناطق آبرفتی بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی و مناطق کوهستانی کمترین پتانسیل آب زیرزمینی را دارند (آرفین[1]، ۲۰۲۰). پراکندگی ژئومورفولوژیک منطقه موردمطالعه شامل مناطق کوهستانی، مناطق تپه‌ماهوری، مناطق مخروط افکنه‌های قدیم و عهد حاضر، دشت‌ها، پادگان‌های آبرفتی و فلات‌ها است. به‌منظور تهیه نقشه پراکندگی بارندگی محدوده مطالعاتی، مقادیر بارندگی بلندمدت (بیست سال گذشته) اندازه‌گیری‌شده در ۴۱ ایستگاه باران‌سنج، تبخیرسنج، سینوپتیک و اقلیم‌شناسی از واحد مطالعات پایه شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان دریافت شد و به روش کریجینگ[2] درون‌یابی شد (جعفرزاده و همکاران، ۲۰۲۱). به‌منظور تهیه لایه DEM منطقه از تصاویر راداری ماهواره ALOS POLSAR[3] با قدر تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر استفاده شد و در ادامه لایه‌های زاویه شیب و جهت شیب تهیه شد. ارتفاع در تعیین جهت و سرعت حرکت رواناب‌های سطحی و پراکندگی آب‌های زیرزمینی نقش مهمی دارد. هم‌جهت شدن شیب توپوگرافیکی و شیب ساختمانی بر تغذیه و جابه‌جایی سفره‌های آب زیرزمینی تأثیر زیادی دارد. شیب در ضریب رواناب و نفوذپذیری نقش مهمی دارد و جریان آب زیرزمینی به‌شدت توسط شیب کنترل می‌شود. شیب‌های ملایم برای آب‌های زیرزمینی در دسته «خوب» تعیین شده‌اند؛ زیرا زمان ماندگاری بیشتری برای نفوذ آب باران در مقایسه با شیب‌های تند می‌دهند (پترا و همکاران، ۲۰۱۸؛ هسیه و همکاران، ۲۰۰۴). به‌منظور تهیه لایه تراکم چشمه‌ها، با توجه به آماربرداری واحد مطالعات شرکت آب منطقه‌ای کردستان، در مجموع ۷۶۶ دهنه چشمه در دوره آماربرداری سیزده سال گذشته (۱۳۸۸-۱۴۰۱) در حوضه مورد مطالعه که اطلاعات

1. Arefin
2. Kriging
3. Advanced Land Observation Satellite POLSAR

کاملی داشت، در تحلیل‌ها استفاده شد. جهت استخراج لایه خطوارگی‌های منطقه موردمطالعه، از باند هشت تصاویر ماهواره‌ای لند ست ۸ استفاده شد (مالاست[1] و همکاران، ۲۰۱۱). لایه خطواره را می‌توان به‌عنوان ناحیه‌ای از سطح ضعیف تعریف کرد. مطالعات نشان داده‌اند، شدت آب زیرزمینی با تراکم خطی بیشتر افزایش می‌یابد (الروزوق[2] و همکاران، ۲۰۱۹؛ یه[3] و همکاران، ۲۰۱٦). لایه خطواره طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (اولبی[4] و همکاران، ۲۰۲۰):

$$LD = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{L_i}{A}\right) Km^{-1}$$ رابطه (۱)

در این رابطه، LD چگالی خطی و هر ویژگی خطی در ناحیه موردمطالعه با i، L_i مجموع تمام طول خط (کیلومتر) و A ناحیه مؤثر شبکه‌های سلول خطی است. تراکم زیاد شبکه زهکشی می‌تواند نشان‌دهنده سازندهایی با استعداد ایجاد جریان‌های متعدد باشد (ماه گلی و همکاران، ۱۳۹۰). تراکم زهکشی رودخانه یک ویژگی ضروری برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی تعریف می‌شود (ادیی[5] و همکاران، ۲۰۱۹؛ هاکیو[6] و همکاران، ۲۰۲۱). فرایند محاسبه تراکم زهکشی از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (اوگاتو[7] و همکاران، ۲۰۲۰):

$$D = L/A$$ رابطه (۲)

در این رابطه، D تراکم زهکشی رودخانه، L طول کل زهکشی رودخانه در حوضه آبخیز (کیلومتر) و A کل مساحت حوضه (کیلومترمربع) است. لایه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی، با استفاده از تصاویر نوری ماهواره سنتینل ۲ و داده‌های راداری ماهواره سنتینل ۱ از سامانه متن‌باز Google Earth Engine با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر تهیه شد و در ۹ دسته کاربری تقسیم شد. برای طبقه‌بندی تصاویر از الگوریتم جنگل تصادفی[8] (RF) استفاده

1. Mallast
2. Al-Ruzouq
3. Yeh
4. Owolabi
5. Adeyeye
6. Haque
7. Ogato
8. Random Forest

شد. اراضی مرتع و اراضی کشاورزی به‌دلیل شخم نفوذپذیری بیشتری در مقایسه با مناطق شهری و مسکونی دارند. مناطق شهری و مسکونی به‌دلیل سطوح نفوذناپذیر متعدد مانند آسفالت که دارند، دارای نفوذپذیری بسیار کمی هستند (هونگ[1] و همکاران، ۲۰۱۸؛ آرفین، ۲۰۲۰). لایه بافت خاک نیز از تصاویر ماهواره‌ای سری سنتینل ۱ و ۲ تهیه شد و برای صحت‌سنجی از داده‌های نمونه‌برداری‌شده واحد آب و خاک اداره جهاد کشاورزی شهرستان سقز استفاده شد. بافت خاک، کنترل‌کننده اولیه نفوذ آب از طریق فضاهای جریان و فرایندهای فیلتراسیون برای رسیدن به آبخوان است. پنج کلاس خاک مانند لومی رسی شنی، لومی رسی، لوم، سیلتی و لوم رسی سیلتی در حوضه شناسایی شد. برای تهیه لایه NDVI از سری زمانی ماهیانه تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ براساس الگوریتم ترکیب حداکثر مقدار[2] (MVC) در سامانه متن‌باز Google Earth Engine استفاده شد. نوع و میزان پوشش گیاهی در یک منطقه نقش مهمی در آب‌های زیرزمینی دارند (آرولبلاجی[3] و همکاران، ۲۰۱۹). شاخص موقعیت توپوگرافی[4] (TPI) ارتفاع هر پیکسل در مدل رقومی ارتفاعی را با میانگین ارتفاع پیکسل‌های اطراف آن مقایسه می‌کند که از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (کانانی و همکاران، ۲۰۱۹):

$$TPI = Z_{.} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} z_i}{n}\right)$$ رابطه (۳)

در این رابطه، $Z_{.}$ ارتفاع سلول مدنظر و $\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} z_i}{n}\right)$ میانگین سلول‌های مجاور است.

شاخص توان آبراهه[5] (SPI) نیز برای توصیف پتانسیل فرسایش جریان است که با مساحت حوضه آبریز و درجه شیب رابطه مستقیم دارد که از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود (کاستانزو[6] و همکاران، ۲۰۱۲):

$$SPI = A_s \times \mathrm{Tan}\beta$$ رابطه (۴)

1. Hong
2. Maximum Value Composite
3. Arulbalaji
4. Topographic Position Index
5. Topographic Position Index
6. Costanzo

در این رابطه، A_s مساحت حوضه (m^2) و β زاویه شیب (درجه) است.

آب‌های زیرزمینی منبع ضروری برای حفظ، فراوانی و توسعه اکوسیستم‌های مختلف به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (ایلیادس[1] و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین به‌طور گسترده برای تعیین کمیت کنترل توپوگرافی فرایندهای هیدرولوژیک و نشان دادن خروج بالقوه آب‌های زیرزمینی ناشی از اثرات توپوگرافی از شاخص رطوبت توپوگرافی[2] (TWI) استفاده شد که از طریق رابطه (۵) به دست می‌آید (اینی[3] و همکاران، ۲۰۲۰):

$$TWI \; \ln\left(\frac{A_s}{Tan\beta}\right)$$ رابطه (۵)

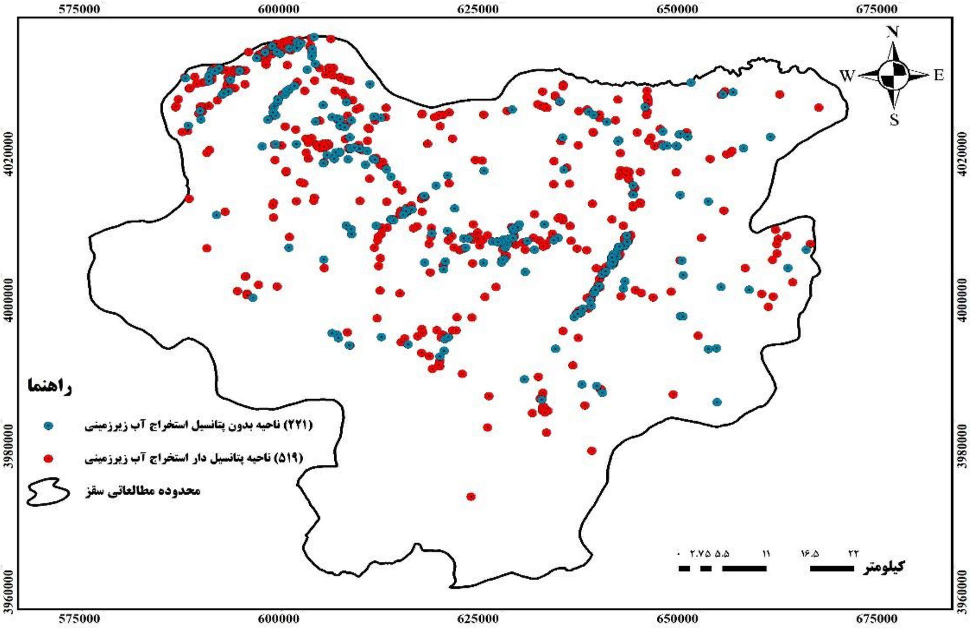
در این رابطه، A_s مساحت حوضه آبخیز (m^2/m) و β زاویه شیب (درجه) است.

۳. ۳. دسته‌بندی چاه‌های آزمایش پمپاژ آب زیرزمینی

براساس آماربرداری انجام‌شده فعال در نیمه دوم سال ۱٤۰۰ و آمار دریافت‌شده از واحد حفاظت شرکت آب منطقه‌ای کردستان، محدوده مطالعاتی شهرستان سقز، در مجموع دارای ۲۲۹٦ چاه استخراجی آب شناسایی، آزمایش پمپاژ و ثبت‌شده است. این چاه‌ها بیشتر در نواحی شمالی محدوده که پست‌تر بود، حفر شده‌اند و اغلب در حاشیه رودخانه‌های اصلی و در کنار ارتفاعات متمرکز شده‌اند. از مجموع ۲۲۹٦ چاه فعال موجود در محدوده مطالعاتی شهرستان سقز، ۲۱۹۷ حلقه چاه (۹۵/٤ درصد) عمق کمتر از ۲۰ متر و ۹۹ حلقه (کمتر از ۵ درصد) عمق بیش از ۲۰ متر دارند. از مجموع ۲۲۹٦ چاه فعال موجود در این محدوده، برداشت از ۱۷۷۰ چاه به مصرف کشاورزی، ۱۰۸ چاه به مصرف شرب و بهداشت شهری و روستایی و ٤۱۸ چاه به مصرف صنعت می‌رسد. اندازه‌گیری ماهانه عمق سطح آب در چاه‌های پیزومتر و کنترل نوسانات آن‌ها یکی از پارامترهای مهم برای شناخت ویژگی‌های هیدروژئولوژیک آبخوان‌های آبرفتی است که به کمک آن‌ها نقشه‌های تراز آب زیرزمینی تهیه می‌شود. با استفاده از این نقشه‌ها، مناطق تغذیه و تخلیه و تبادلات آبی بین آبخوان‌ها و

1. Eliades l
2. Topographic Wetness Index
3. Eini

جریان‌های سطحی در هر محدوده مشخص می‌شود. با توجه به نقشه‌های تـراز آب زیرزمینـی در دشت‌های دارای شبکه چاه‌های مشاهده‌ای، اغلب ملاحظه می‌شود که منحنی‌هـای تـراز بـا رقومِ زیاد در دامنه و نواحی مخروطه افکنه‌ها و ورودی رودخانه‌ها و مسیل‌ها قرار دارند و بـه سمت نواحی مرکزی و خروجی از رقوم منحنی‌ها کم می‌شود. درمجموع، ۷۴۰ حلقه چاه آب زیرزمینی که آبدهی بیشتر از ۲/۵ لیتر برثانیه داشتند، در منطقه مطالعـاتی شناسـایی شـدند کـه به‌طور تصادفی بـه دو بخـش ۷۰ درصـد گـروه داده‌هـای آموزشـی و ۳۰ درصـد گـروه داده اعتبارسنجی تقسیم شدند. محدوده مطالعاتی، آبدهی ۲/۵ لیتـر بـر ثانیـه بـه‌عنوان حـد آسـتانه براساس نظرات کارشناسان منابع آب، شرایط جوی و محیطی برای فرایند مدل‌سازی اسـتفاده است (شکل ۳).

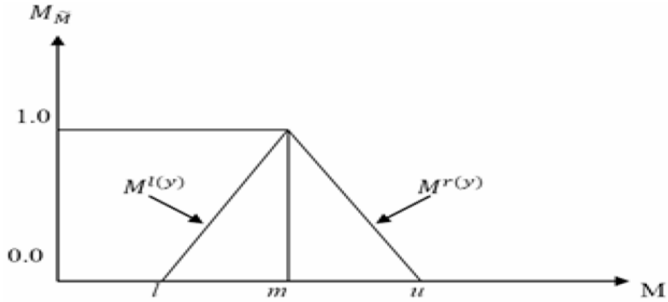


شکل ۳. دسته مجموعه چاه‌های مشاهداتی

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱

۳. ٤. مدل منطق فازی

بنیان‌گذار منطق فازی، لطفی‌زاده استاد دانشگاه کالیفرنیا، است. وی منطق فازی را به‌عنوان روشی علمی پایه‌گذاری کرد. منطق فازی متدولوژی‌های مختلفی برای بررسی منطقی دانش و علومی است که همراه با ابهام و عدم قطعیت هستند را پیشنهاد می‌کند. نظریه مجموعه‌های فازی در تصمیم‌گیری چند معیاره، یک تکنیک مدل‌سازی است که سیستم‌های پیچیده‌ای را تحریک می‌کند که توصیف آن‌ها با اعداد واضح دشوار است. فازی راه بسیار آسانی برای نتیجه‌گیری از اطلاعات دارای ابهام و عدم دقت ارائه می‌کند (بالزنتین[1] و همکاران، ۲۰۱۱). برای برنامه‌ریزی فضایی، منطق فازی معمولاً هنگام تصمیم‌گیری برای اجرای شیء فضایی روی نقشه به‌عنوان اعضای یک مجموعه گنجانده می‌شود. در نظریه مجموعه‌های کلاسیک، عضویت یک مجموعه به‌صورت درست یا غلط تعریف می‌شود؛ درحالی‌که طبق نظریه مجموعه فازی عضویت جزئی یک مجموعه با دادن ضرایب بین صفر (عدم عضویت) و یک (عضویت کامل) به عوارض طبقه‌بندی‌شده امکان‌پذیر می‌شود؛ این نشان‌دهنده درجه تابع عضویت است (حجازی‌زاده و همکاران، ۱٤۰۰). یک عدد فازی مثلثی M (TFN)[2] در شکل ٤ نشان داده شده است.



شکل ٤. یک عدد فازی مثلثی M

مأخذ: پاکسوی[3] و همکاران، ۲۰۱۲

1. Balezentiene
2. Triangular Fuzzy Number
3. Paksoy

TFNها به‌سادگی با (l/m, m/u) یا (l, m, u) نشان داده می‌شوند که به‌ترتیب کمترین مقدار ممکن، محتمل‌ترین مقدار و بیشترین مقدار ممکن است. در مدت عضویت، TFN یک نمایش خطی در سمت راست و چپ خود دارد که می‌توان به رابطه (٦) اشاره کرد (پاکسوی و همکاران، ۲۰۱۲):

رابطه (٦)

$$\mu(x \backslash M) = \begin{cases} 0, & x < l \\ (x-l)/(m-l), & l \leq x \leq m \\ (u-x)/(u-m), & m \leq x \leq u \\ 0, & x > u \end{cases}$$

رابطه (۷) عدد فازی هر درجه عضویت را براساس نمایش چپ و راست نشان می‌دهد (کهرمان و کایا[1]، ۲۰۱۰):

رابطه (۷)

$$M = (M^{l(y)}, M^{r(y)})$$
$$(l + m - l)y,\ \ u + (m - u)y)$$

که در آن l(y) و r(y) به ترتیب سمت چپ و سمت راست یک عدد فازی را نشان می‌دهند.

۳. ۵. تابع عضویت فازی (FMF)

تابع اولیه تئوری مجموعه فازی می‌تواند داده‌های مبهم را نشان دهد (حجازی‌زاده و همکاران، ۱٤۰۰). برای پیش‌بینی پتانسیل آب‌های زیرزمینی، تئوری مجموعه‌های فازی اجازه می‌دهد تا مفهوم عضویت در مکان جزئی برای کلاس‌های متعدد در نظر گرفته شود. در این پس‌زمینه مفهومی، FMF[2]ها به تجزیه و تحلیل واریانس فضایی اختصاص داده شدند و الگوی آن‌ها به توسعه مرزهای فازی برای هر منطقه بالقوه منجر شد. FMFها به واریانس اختصاص داده شدند و روند آن‌ها به مرزهای فازی برای هر منطقه بالقوه درحال‌توسعه منجر شد.

1. Kahraman & Kaya
2. Fuzzy Membership Function

۳. ٦. مدل وزن دهی به معیارها

روش‌های وزن‌دهی مختلفی برای ارزیابی اهمیت معیارها برای تصمیم‌گیران وجود دارد. این روش‌ها شامل روش رتبه‌ای، روش نسبی، روش مقایسه دوتایی و روش تحلیل توازن است. تفاوت این روش‌ها در اصل تئوری، دقت، سهولت کاربرد و فهم‌پذیر بودن آن برای تصمیم‌گیران است (مالیک و همکاران، ۲۰۱٤). روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) را یک روش کارآمد برای مدیریت منابع آب و محیط‌زیست شناخته‌اند. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که تجزیه و تحلیل چندمعیاره مبتنی بر GIS نیز در شناسایی مناطق برای تغذیه آب زیرزمینی مفید است (سینگ و همکاران، ۲۰۱۷).

درمجموع، ۱۰ کارشناس خبره (شش کارشناس ارشد منابع آب و متخصصان هیدروژئولوژیست، سه کارشناس زمین‌شناسی و یک کارشناس معدن) از طریق یک پرسشنامه در زمینه مهندسی هیدروژئولوژی و منابع آب که به‌طور صریح طراحی‌شده بود، مصاحبه شدند، تا نظرهای آن‌ها درمورد اهمیت نسبی متغیرهای هیدرولوژیک، هواشناسی، توپوگرافی و محیطی مؤثر بر وقوع آب‌های زیرزمینی به دست آید. علاوه بر این، با هیدروژئولوژیست‌های محلی برای درک دیدگاه‌هایشان درباره اهمیت نسبی موضوع و کلاس‌های ویژگی آن‌ها مشورت شد. نظرهای کارشناسان و بررسی ادبیات موجود (جدول ۱) برای تخصیص و استانداردسازی وزن‌های مناسب بررسی شد. ساعتی (۱۹۸۰) تخصیص وزن را پیشنهاد کرد: AHP وزن‌های لازم مربوط به لایه‌های موضوعی مناسب را برای پشتیبانی از ماتریس انتخاب‌شده با مقایسه و تجزیه و تحلیل همه معیارهای (لایه‌های موضوعی) شناسایی‌شده تخمین می‌زند (الویس و همکاران، ۲۰۲۲؛ ساجیل و همکاران، ۲۰۲۲). ازآنجاکه AHP معمولی نمی‌تواند به‌طور دقیق انتخاب انسان را براساس بیان کمی ترجیحات نشان دهد، ارتقای فازی AHP (FAHP) برای پرداختن به فازی ایجاد شده است. در مسائل سلسله‌مراتبی در این تحقیق، از روش FAHP برای فازی کردن تحلیل سلسله‌مراتبی با اجازه دادن به اعداد فازی برای مقایسه‌های زوجی به‌منظور ارزیابی وزن‌های فازی استفاده کردیم.

برای ارزیابی وزن معیارهای ارزیابی با استفاده از FAHP مراحل زیر در نظر گرفته شد (چن و لی[1]، ۲۰۰۳):

مرحله اول: ماتریس‌های مقایسه دوبه‌دو با استفاده از همه معیارها در ابعاد سیستم سلسله‌مراتبی ایجاد شدند. اصول زبانی در ارزیابی‌های زوجی به شرح زیر اعمال شد و در هر مورد یکی از دو پارامتر مرتبط‌تر بود.

$$\bar{A}\begin{bmatrix} \tilde{1} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{1} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{1} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{1} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\tilde{a}_{n1} & 1/\tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{1} \end{bmatrix}$$ رابطه (۸)

درجایی که اندازه $\tilde{a}_{ij}$ نشان‌دهنده یک جفت معیار i و j است، بگذارید $\tilde{1}$ (۱،۱،۱) باشد؛ زمانی که i برابر j باشد (یعنی i = j). اگر $\tilde{1}$، $\tilde{2}$، $\tilde{3}$، $\tilde{4}$، $\tilde{5}$، $\tilde{6}$، $\tilde{7}$، $\tilde{8}$، $\tilde{9}$ را اندازه‌گیری کنید که معیار i برای معیار j و سپس $\tilde{1}^{-1}$، $\tilde{2}^{-1}$، $\tilde{3}^{-1}$، $\tilde{4}^{-1}$، $\tilde{5}^{-1}$، $\tilde{6}^{-1}$، $\tilde{7}^{-1}$، $\tilde{8}^{-1}$، $\tilde{9}^{-1}$ را اندازه‌گیری کنید که معیار j برای معیار i نسبتاً مهم است. در پژوهش مالیک و همکاران (۲۰۱۸) مقیاس تبدیل فازی در رابطه (۸) توضیح داده‌شده است؛

مرحله دوم: از روش میانگین هندسی با کلی برای تعیین میانگین هندسی فازی و وزن فازی معیار از رابطه (۹) استفاده شد (باکلی[2]، ۱۹۸۵):

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \times \tilde{a}_{i2} \times \ldots . \times \tilde{a}_{in})^{1/n}$$
$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \times (\tilde{r}_i \times \ldots . \times \tilde{r}_n)^{-1}$$ رابطه (۹)

که در آن $\tilde{a}_{in}$ مقدار مقایسه فازی معیار i با معیار n است؛ بنابراین، $\tilde{r}_i$ میانگین هندسی مقدار مقایسه فازی معیار i برای هر معیار است. در $\tilde{w}_i$، i وزن فازی معیار است و می‌توان آن را با یک TFN نشان داد $\tilde{w}_i = (lw_i, mw_i, uw_i)$ که در آن lw_i، mw_i، uw_i به‌ترتیب مقادیر پایین، میانی و بالای وزن فازی معیار i th را نشان می‌دهند.

1. Chen and Lee
2. Buckley

جدول ۲. مقادیر ترجیحی برای ماتریس درجه‌بندی ساعتی در فرایند سلسله‌مراتبی (ساتی[1]، ۱۹۹۰)

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱

ارزش	وضعیت مقایسه i نسبت به j	توضیح
۱	ترجیح یکسان Equally Preferred	عنصر i و j اهمیت برابر دارند
۳	کمی مرجح Moderately Preferred	عنصر i و j کمی مهم‌تر دارند
۵	خیلی مرجح Strongly Perferred	عنصر i و j مهم‌تر دارند
۷	خیلی زیاد مرجح Very Strongly Perferred	عنصر i و j خیلی مهم‌تر دارند
۹	کاملاً مرجح Strongly Perferred	عنصر i و j کاملاً مهم‌تر دارند
۸-۲-۴-۶	ترجیحات بین فواصل فوق	ارزش‌های بینابین را نشان می‌دهد

جدول ۳. شاخص تصادفی بودن (R.I)

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R.I	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57

۳. ۷. فرایند تحلیل سلسله مراتبی[2] (AHP)

اولین بار توماس ساعتی در سال ۱۹۸۰ فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) را مطرح کرد. AHP برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه به کار می‌رود؛ زیرا با استفاده از این مدل می‌توان معیارها را به‌صورت سلسله‌مراتبی با هم مقایسه کرد. روش AHP برای MCDM در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای نقشه‌برداری پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شده است. به‌طور گسترده، در زمینه‌های مختلف مدیریت منابع طبیعی، تجزیه و تحلیل اثرات زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی منطقه‌ای استفاده شده و به‌طور مؤثر اجرا شده است (رحمان و همکاران، ۲۰۱۵؛ رادولویچ[3] و همکاران، ۲۰۲۲).

---

1. Saaty
2. Analytical Hierarchy Process
3. Radulović

۳. ۷. ۱. ارزیابی و مقایسه روش‌ها

باوجود محبوبیت AHP، به‌دلیل اطلاعات یا دانش ناقص و عدم قطعیت درمورد تصمیم‌گیری، ممکن است برای تصمیم‌گیرندگان درباره سطح ترجیح آن‌ها ذهنی و مبهم باشد. همچنین بسیاری از محققان به اعتبار نظری و اثربخشی تجربی AHP پرداخته‌اند (کایاستا[1] و همکاران، ۲۰۱۳). در تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، AHP را می‌توان با روش‌های منطق فازی ترکیب کرد و چارچوبی برای ارزیابی و قابلیت اطمینان معیارها از طریق استفاده از توابع عضویت فازی[2] (FMFs) ایجاد کرد (وانگ، ۲۰۰۹؛ لی و ویل، ۲۰۰۵؛ آپریکویک و تزنگ، ۲۰۰۳). با اختصاص دادن تابع عضویت یا عدم عضویت هر معیار به هر شیء، معیار موضوعی در چارچوب MCDM با استفاده از مجموعه‌های فازی استاندارد شده است (گرسوسکی و جانکوسکی[3]، ۲۰۱۰). ترکیب AHP با تئوری مجموعه‌های فازی به انعطاف‌پذیری بیشتری در تجزیه و تحلیل نتایج و تصمیم‌گیری‌های بعدی اجازه می‌دهد. هدف AHP در نظر گرفتن دانش تخصصی است و ازآنجاکه AHP معمولی نمی‌تواند به‌طور دقیق انتخاب انسان را براساس بیان کمی ترجیحات نشان دهد، ارتقای فازی AHP برای پرداختن به فازی ایجاد شده است (وانگ، ۲۰۰۹). در این پژوهش، از روش فازی AHP برای فازی کردن تحلیل سلسله‌مراتبی با اجازه دادن به اعداد فازی برای مقایسه‌های زوجی برای ارزیابی وزن‌های فازی استفاده شد.

۳. ۷. ۲. بررسی انسجام نداشتن ماتریس توسعه‌یافته

ساعتی، شاخص سازگاری[4] (CI) را به‌عنوان انحراف یا درجه سازگاری تعریف کرد. این یک معیار سازگاری است و با معادله زیر به دست می‌آید:

رابطه (۱۰)
$$CI = \frac{\lambda_{max} \times n}{n-1}$$

1. Kayastha
2. Fuzzy Membership Functions
3. Gorsevski and Jankowski
4. Consistency Index

که در آن λ_{max} حداکثر مقدار ویژه ماتریس قضاوت و n تعـداد معیارهـا اسـت کـه بـا استفاده از معادله رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

رابطه (۱۱)
$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum \frac{(A_W)i}{W_i}$$

وزن هر لایه موضوعی از حداکثر مقدار ویژه در مقدار ویژه نرمال‌شده در ماتریس مقایسه زوجی به دست می‌آید. اعتبار به نسبت ضریب سازگاری[1] (CR) وابسته است و مقدار آن باید کمتر یا مساوی بـا ۰/۱ باشـد. در صـورت تجـاوز از ایـن حـد، پیشـنهاد می‌شـود در فراینـد تجدیدنظر شود. CR با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

رابطه (۱۲)
$$CR = \frac{CI}{RI} = ۰.۰۵ \quad < ۰.۱ \qquad OK$$

۳. ۸ منحنی مشخصه عملکردی سیستم (ROC)

در این مطالعه، از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)[2] که یک تکنیک استاندارد برای ارزیابی دقت یک آزمون تشخیصی است، استفاده شد. تجزیـه و تحلیـل منحنـی ROC بـرای اعتبارسنجی کیفی مجموعه داده‌های بـالقوه آب زیرزمینـی توسـعه‌یافتـه توسـط فـازی AHP استفاده شد (مقدمی و همکاران، ۲۰۱۵؛ رگمی[3] و همکاران، ۲۰۱٤). منحنـی ROC در محـور X مقدار مثبت کاذب[4] (FP) و در محـور Y مقـدار مثبـت واقعـی[5] (TP) را ترسـیم مـی‌کنـد (پرادهان[6]، ۲۰۱۳). ناحیه زیر منحنی ROC (AUC)[7] بـا توضـیح توانـایی سیسـتم در انتظـار وقوع یا وقوع نیافتن دقیق «رویدادهای» ازپیش‌تعریف‌شده، دقت یک فرایند پیش‌بینی را نشـان

1. Consistency Ratio
2. Receiver Operating Characteristic
3. Regmi
4. False Positive
5. True Positive
6. Pradhan
7. Area Uder Curve

می‌دهد. منحنی با بزرگ‌ترین AUC بهترین روش است. نقیبی و همکاران (۲۰۱۵) رابطه بین AUC و دقت پیش‌بینی را به‌صورت رابطه (۱۳) خلاصه کردند:

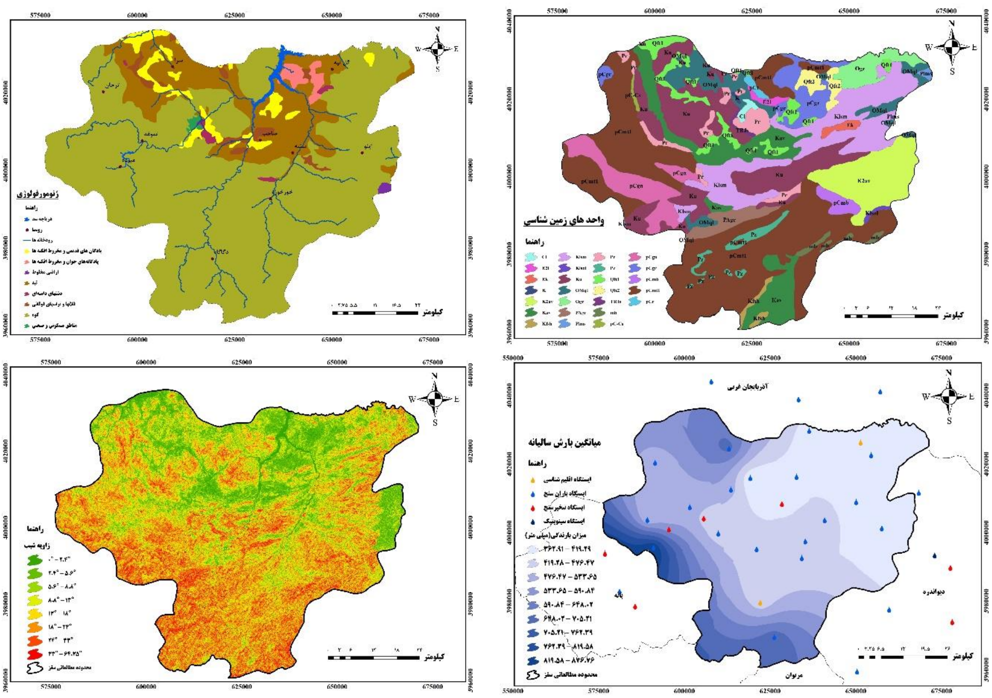
$$ROC = \sum_{i=۱}^{n}[x_i + ۱ - x_i]\left[y_i + y_i + ۱ - \frac{y_i}{۲}\right]$$ رابطه (۱۳)

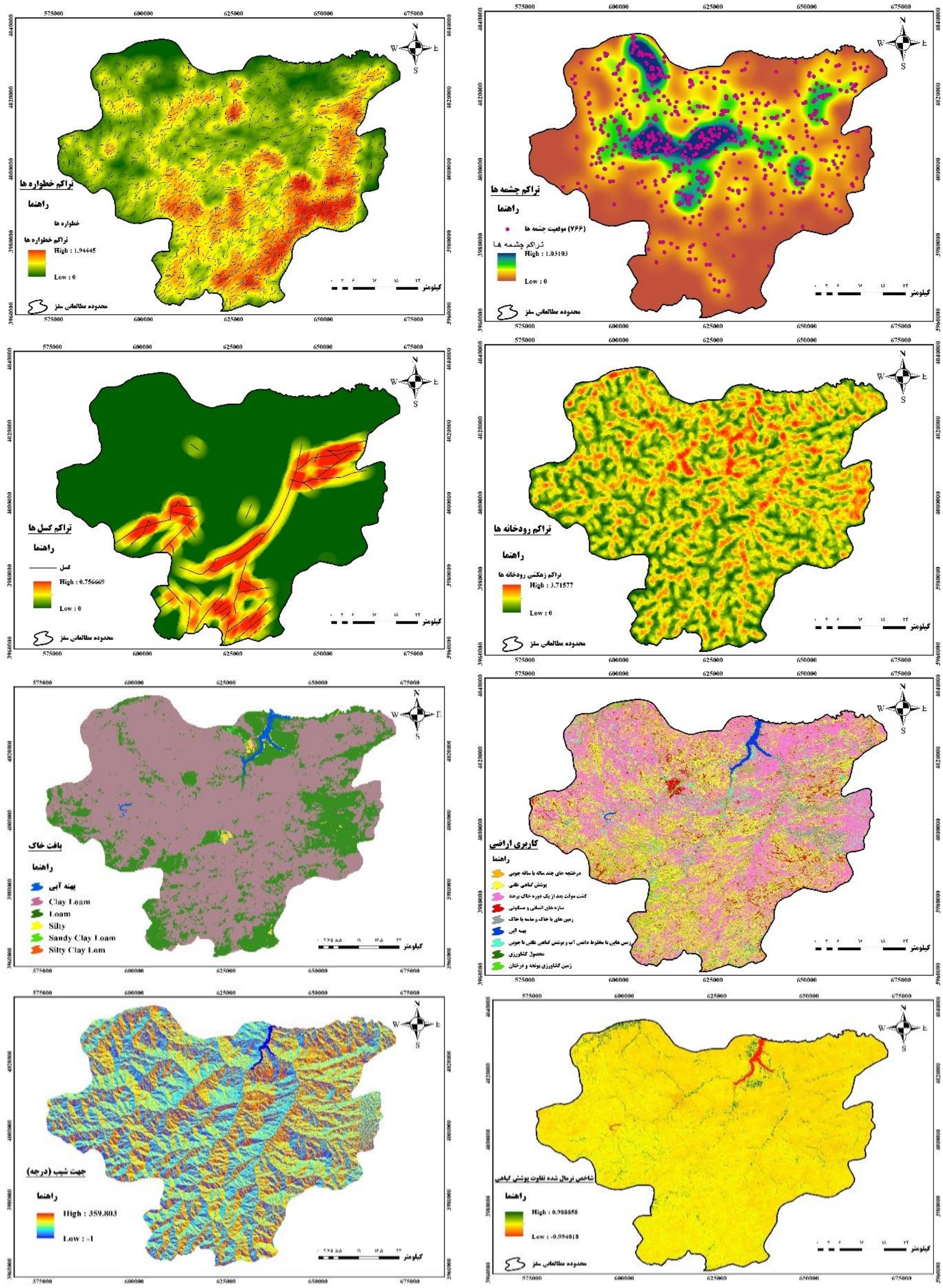
در این رابطه، x_i میزان مثبت کاذب برای سناریو i و y_i میزان مثبت واقعی برای سناریوی i است و n تعداد سناریوها است.

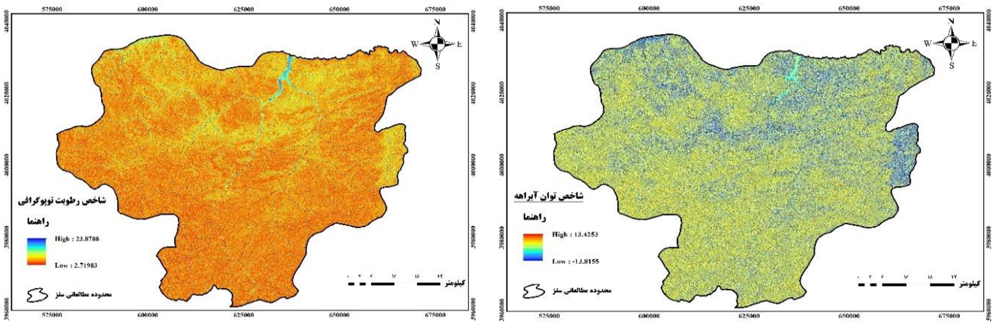
٤. یافته‌های تحقیق

٤. ۱. آماده‌سازی معیارها

در این مطالعه از ١٤ معیار زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هواشناسی، توپوگرافی و محیطی برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی استفاده شد که لایه‌های مربوط به هر معیار در شکل ۵ آورده شده است.




تراکم خطواره ها
راهنما
High : 1.94445
Low : 0
تراکم چشمه ها
راهنما
High : 1.03103
Low : 0
تراکم گسل ها
راهنما
High : 0.756669
Low : 0
تراکم رودخانه ها
راهنما
High : 3.71577
Low : 0
بافت خاک
راهنما
پهنه آبی
Clay Loam
Loam
Silty
Sandy Clay Loam
Silty Clay Lom
کاربری اراضی
راهنما
جهت شیب (درجه)
راهنما
High : 359.803
Low : -1
شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی
راهنما
N
S
W
E



شکل ۵. معیارهای زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هواشناسی، توپوگرافی و محیطی مؤثر بر پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۱

ماتریس مقایسه زوجی ۱٤ معیار بررسی‌شده در جدول ٤ آورده شده است. تغذیه آب‌های زیرزمینی در بیشتر مناطق داخل محدوده به‌استثنای مناطق سنگی وجود دارد، ولی در مناطق واحدهای کربناته و کربناته–آواری بیشتر، مناطق مخروط‌افکنه‌ای و پادگان‌های آبرفتی قدیمی‌تر و جوان‌تر، میزان بارش سالیانه، منطقه شیب (۰,۱ – ۱,۹)، درجه تراکم زهکشی رودخانه‌ها > ۲,٦، رسوبات تراس دره، مزارع کشاورزی و تراکم خطواره‌ها > ۱,٥، منطقه متوسط تا عالی برای پتانسیل آب زیرزمینی است. نتایج تأیید کرد که پتانسیل آب زیرزمینی عمدتاً توسط لیتولوژی، ژئومورفولوژی، میزان بارندگی، زاویه شیب تراکم خطواره‌ها، تراکم گسل، کاربری زمین و تراکم زهکشی کنترل می‌شود که وزن‌دهی به هریک از معیارهای مذکور در جدول ٥ و شکل ٦ آورده شده است.

جدول ۴. ماتریس مقایسه زوجی چهارده معیار موردبررسی

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱

Item	Litho	Geo	Rain	Slope	SP	LD	DD	FD	LU	Soil	NDVI	TPI	SPI	TWI
Litho	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	5.00	5.00	5.00	7.00	7.00	7.00	9.00	9.00
Geo	0.50	1.00	3.00	3.00	3.00	4.00	5.00	5.00	5.00	5.00	7.00	7.00	7.00	9.00
Rain	0.50	0.33	1.00	1.00	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	3.00	7.00
Slope	0.33	0.33	1.00	1.00	1.00	3.00	3.00	3.00	5.00	3.00	5.00	7.00	3.00	7.00
SP	0.33	0.33	0.33	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	7.00
LD	0.25	0.25	0.33	0.33	0.50	1.00	2.00	2.00	3.00	5.00	7.00	7.00	3.00	9.00
DD	0.20	0.20	0.33	0.33	0.50	0.50	1.00	3.00	5.00	3.00	5.00	7.00	7.00	7.00
FD	0.20	0.20	0.20	0.33	0.33	0.50	0.33	1.00	5.00	5.00	3.00	7.00	7.00	9.00
LU	0.20	0.20	0.20	0.20	0.33	0.33	0.20	0.20	1.00	3.00	3.00	5.00	7.00	7.00
Soil	0.14	0.20	0.20	0.33	0.33	0.20	0.30	0.20	0.33	1.00	3.00	5.00	5.00	7.00
NDVI	0.14	0.14	0.20	0.20	0.20	0.14	0.20	0.33	0.33	0.33	1.00	5.00	5.00	7.00
TPI	0.14	0.14	0.20	0.14	0.20	0.14	0.14	0.14	0.20	0.20	0.20	1.00	7.00	9.00
SPI	0.11	0.14	0.33	0.33	0.20	0.33	0.14	0.14	0.14	0.20	0.20	0.14	1.00	5.00
TWI	0.11	0.11	0.14	0.14	0.14	0.11	0.14	0.11	0.14	0.14	0.14	0.11	0.20	1.00

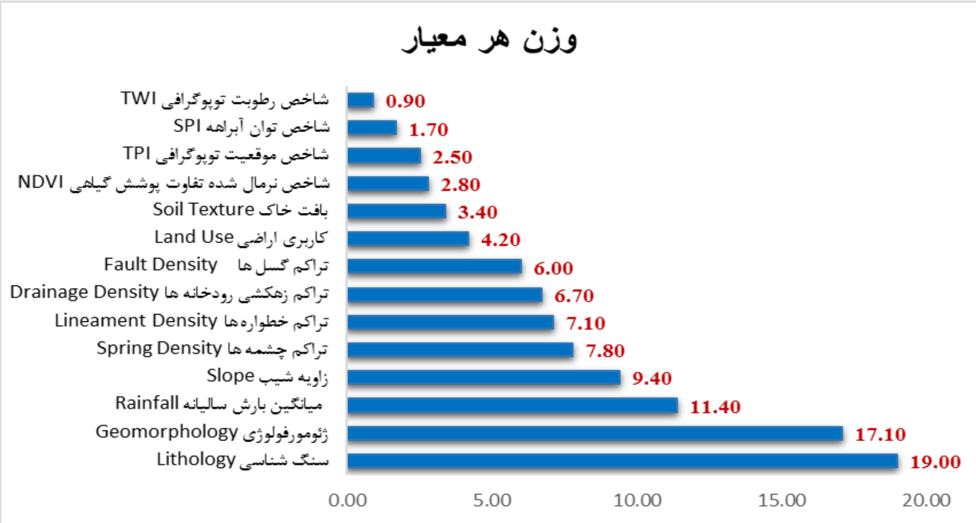
Litho = Lithology, Geo = Geomorphology, Rain = Rainfall, SD = Spring Density, LD = Lineament Density, FD = Fault Density, LU = Land Use, Soil = Soil Texture, NDVI = Normalized Difference Vegetation Index, TPI = Topographic Position Index, SPI = Stream Power Index, TWI = Topographic Wetness Index

جدول ۵. محاسبه وزن‌های نرمال شده برای ۱۴ لایه موضوعی با استفاده از تکنیک‌های FAHP

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱

Item	Litho	Geo	Rain	Slope	SP	LD	DD	FD	LU	Soil	NDVI	TPI	SPI	TWI	Normalayzed Weight
Litho	0.241	0.359	0.211	0.265	0.218	0.208	0.223	0.178	0.131	0.171	0.136	0.103	0.130	0.090	0.190
Geo	0.120	0.180	0.317	0.265	0.218	0.208	0.223	0.178	0.131	0.122	0.136	0.103	0.101	0.090	0.171
Rain	0.120	0.059	0.106	0.088	0.218	0.156	0.134	0.178	0.131	0.122	0.097	0.073	0.043	0.070	0.114
Slope	0.080	0.059	0.106	0.088	0.073	0.156	0.134	0.107	0.131	0.073	0.097	0.103	0.043	0.070	0.094
SP	0.080	0.059	0.035	0.088	0.073	0.104	0.089	0.107	0.079	0.073	0.097	0.073	0.072	0.070	0.078
LD	0.060	0.045	0.035	0.029	0.036	0.052	0.089	0.071	0.079	0.122	0.136	0.103	0.043	0.090	0.071
DD	0.048	0.036	0.035	0.029	0.036	0.026	0.045	0.107	0.131	0.073	0.097	0.103	0.101	0.070	0.067
FD	0.048	0.036	0.021	0.029	0.024	0.026	0.015	0.036	0.131	0.122	0.058	0.103	0.101	0.090	0.060
LU	0.048	0.036	0.021	0.018	0.024	0.017	0.009	0.007	0.026	0.073	0.058	0.073	0.101	0.070	0.042
Soil	0.034	0.036	0.021	0.029	0.024	0.010	0.013	0.007	0.009	0.024	0.058	0.073	0.072	0.070	0.034
NDVI	0.034	0.025	0.021	0.018	0.015	0.007	0.009	0.012	0.009	0.008	0.019	0.073	0.072	0.070	0.028
TPI	0.034	0.025	0.021	0.012	0.015	0.007	0.006	0.005	0.005	0.005	0.004	0.015	0.101	0.090	0.025
SPI	0.027	0.025	0.035	0.029	0.015	0.017	0.006	0.005	0.004	0.005	0.004	0.002	0.014	0.050	0.017
TWI	0.027	0.020	0.015	0.012	0.010	0.006	0.006	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.003	0.010	0.009

Litho = Lithology, Geo = Geomorphology, Rain = Rainfall, SD = Spring Density, LD = Lineament Density, FD = Fault Dendity, LU = Land Use, Soil = Soil Texture, NDVI = Normalized Difference Vegetation Index, TPI = Topographic Position Index, SPI = Stream Power Index, TWI = Topographic Wetness Index



شکل ٦. وزن‌دهی معیارهای زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هواشناسی، توپوگرافی و محیطی با استفاده از روش FAHP

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۱

٤. ۲. تهیه نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه از طریق ادغام نقشه‌های ویژگی به دست آمد؛ بر این اساس، از روش تجمیع ترکیب خطی وزنی[1] (WLC) برای محاسبه ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی استفاده شد که معادله آن در رابطه (۱٤) آورده شده است (مالزوسکی و رانر[2]، ۲۰۱۵):

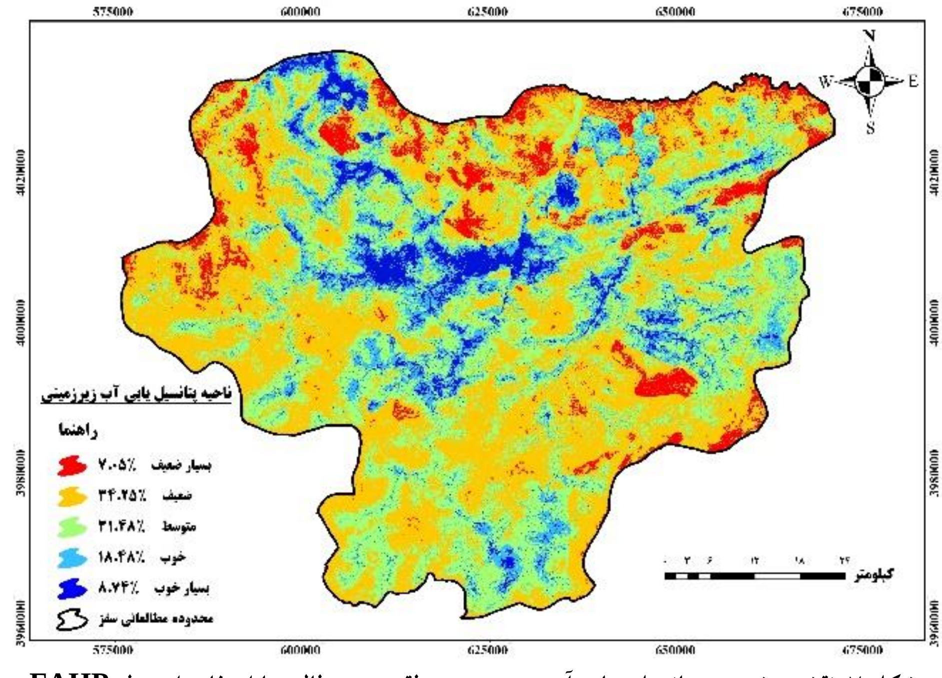
$$GWPI = \sum_{w=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} (w_j \times x_i) \quad \text{رابطه (۱٤)}$$

در این رابطه، $GWPI$ شاخص پتانسیل آب زیرزمینی، x_i نقشه‌های موضوعی فازی‌شده، w_j وزن نرمال‌شده، m تعداد کل موضوعات و n تعداد کل کلاس‌ها است. براساس وزن محاسبه‌شده برای هر کلاس از عوامل مؤثر، هریک از عوامل مؤثر وزن‌دهی شد و نقشه

1. Weighted Linear Combination
2. Malczewski and Rinner

پتانسیل منابع آب زیرزمینی شهرستان سقز تهیه شد. نتایج این مطالعه رویکرد تحلیل همپوشانی وزنی را با استفاده از تکنیک فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی در بستر GIS که یکی از دانش‌های مؤثر برای پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی است، خلاصه کرد. از ۱٤ معیار زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هواشناسی، توپوگرافی و محیطی می‌توان منطقه موردمطالعه را به مناطق مختلف بالقوه آب زیرزمینی طبقه‌بندی کرد.

مناطق بالقوه آب زیرزمینی عالی در مناطقی یافت می‌شوند که واحدهای کربناته و کربناته–آواری و شکسته با چگالی خطواره > ۱,۵، مخروطافکنه‌ها، شرایط شیب مسطح تا ملایم، عمدتاً مشخص شده است. بخشی از زمین‌های زراعی و دشت آبرفتی، با تراکم زهکشی کم تا زیاد و خاک از ماسه‌ریز و درشت است. نتایج نشان داد، پتانسیل آب زیرزمینی بیشتر توسط لیتولوژی، ژئومورفولوژی، بارندگی، تراکم چشمه‌ها، زاویه شیب، خطواره‌ها، تراکم زهکشی رودخانه‌ها، تراکم گسل و کاربری زمین کنترل می‌شود.



شکل ۷. نقشه پیش‌بینی پتانسیل منابع آب زیرزمینی منطقه موردمطالعه با استفاده از مدل FAHP

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۱

نگاهی دقیق به نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی، مناطقی با پتانسیل خوب و بسیار خـوب آب زیرزمینی را در مرکز، شمال غربی، شرق، بخش‌های کوچک جنـوبی منطقـه مطالعـه‌شـده نشان می‌دهد (شکل ۷). این مناطق با تراکم زیاد زهکشی رودخانه‌ها و همچنین شیب‌های کم و متوسط مشخص‌شده‌اند. این مطلب تأیید می‌کند که در مرکـز حوضـه واحـدهای کربناتـه و کربناته–آواری، به‌دلیل تشکیل درزه و شکاف‌های طویل و عمیق ناشی از شـکنندگی سـنگ و داشتن قابلیت انحلال و پتانسیل توسعه کارست امکـان افـزایش آب زیرزمینـی را دارد. نتـایج حاصل با مطالعـات القیـدی و همکـاران (۲۰۱۹)، ادیـی و همکـاران (۲۰۱۹) و داس (۲۰۱۷) مطابقت دارد. پهنه‌های آب زیرزمینی معتدل در منتهاالیه شمال شـرق و جنـوب غربـی منطقـه موردمطالعه مشاهده شد. مناطق با پتانسیل آب زیرزمینـی ضـعیف در بخـش شـمالی، جنـوب شرقی و غرب یافت شدند؛ بااین‌حال، مناطق بالقوه آب زیرزمینی ضعیف عمدتاً به زمین‌هـای تپه‌ای و در سکونتگاه‌ها محدود می‌شوند، اما می‌توانند به‌دلیل فعالیت‌های انسانی‌ای باشند کـه به چشم‌انداز کم منجر می‌شوند. این مناطق با وجـود شـیب تنـد، بارنـدگی کـم و واحـدهای سنگی کنگلومرا، واحد شـیل، کرتاسـه، سـنگ‌های پرکـامبرین و سـنگ‌های آذریـن مشـخص شده‌اند؛ بنابراین مناطق شناسایی‌شده در این مطالعه به‌طور ایده‌آل برای مناطق تغذیه مصـنوعی آب زیرزمینی مناسب هستند. نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینـی یکپارچـه تولیدشـده در اینجـا اطلاعاتی درمورد مکان‌هایی ارائه می‌دهند که آب‌های زیرزمینی می‌توانند در شـرایط بارنـدگی معمولی تجدید شوند و می‌توانند برای فرایندهای مختلف تصـمیم‌گیری بـرای مـدیریت بهتـر منابع آب زیرزمینی مفید باشند. مساحت و درصد نواحی پتانسیل‌یابی شده در جـدول ٦ آورده شده است.

٤. ۳. اعتبارسنجی نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی با منحنی (ROC)

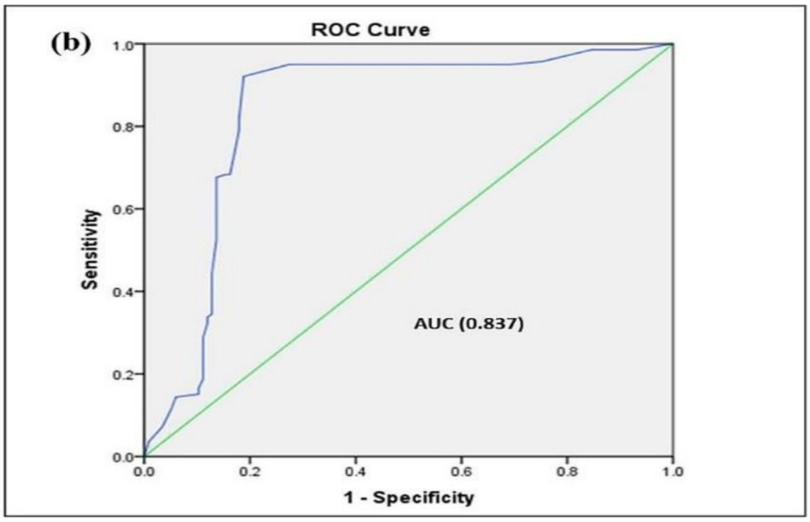
ناحیه زیر منحنی ROC (AUC) با توضیح توانایی سیستم در انتظار وقوع یا وقـوع‌نیـافتن دقیق «رویدادهای» ازپیش‌تعریف‌شده، دقت یک فرایند پیش‌بینی را نشان می‌دهـد. درمجمـوع، از ۷٤۰ چاه موجود ۳۰ درصد از آن‌ها یعنی ۲۲۲ حلقه به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی شناسایی شد و برای تهیه منحنی ROC نقشه پتانسیل پیش‌بینی‌شـده آب‌هـای زیرزمینـی اسـتفاده شـد.

نتیجه ROC سطح زیر منحنی ۸۳,۷٪ = AUC را نشان می‌دهد؛ یعنی آب زیرزمینی مبتنی بر FAHP موفقیت‌آمیز است و مدل می‌تواند به‌درستی آب‌های زیرزمینی را شناسایی کند. برای آزمایش اعتبار مدل‌های AHP محققان زیادی از مقادیر AUC منحنی ROC در شرایط مختلف استفاده کرده‌اند.

جدول ٦. آمار دسته‌های تلفیقی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی

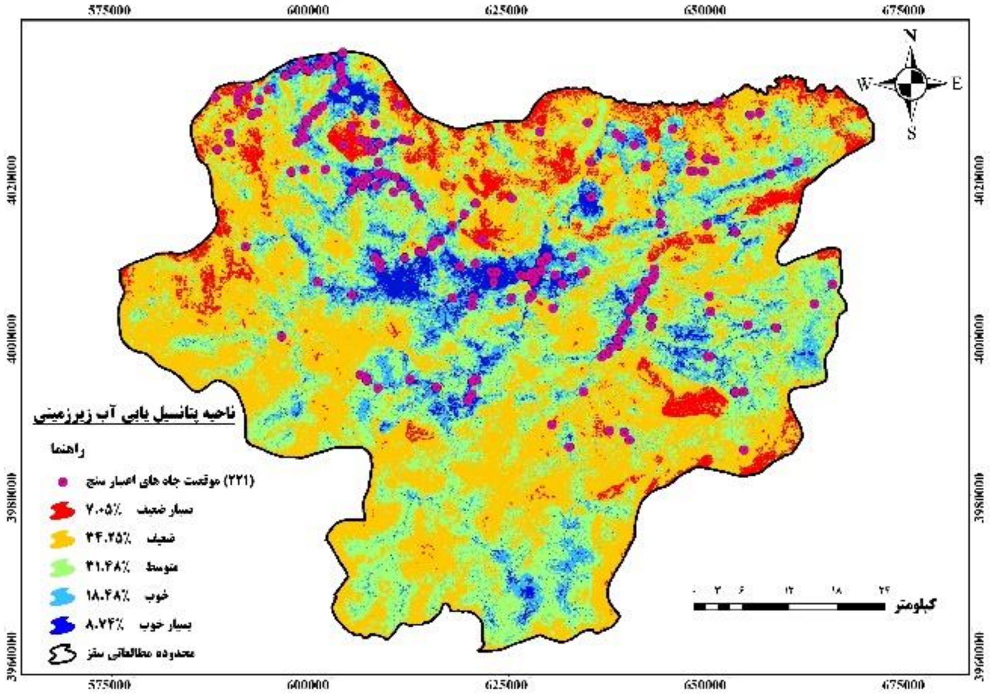
مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۱

ردیف	نواحی پتانسیل‌یابی شده	مساحت(کیلومترمربع)	مساحت(درصد)
۱	پتانسیل بسیار ضعیف	۳۱۷,۲٤	٪۷,۰۵
۲	پتانسیل ضعیف	۱٥٤۰,۲۷	٪۳٤,۲٥
۳	پتانسیل متوسط	۱٤۱٥,۱۰	٪۳۱,٤۸
٤	پتانسیل خوب	۸۳۰,۹٤	٪۱۸,٤۸
٥	پتانسیل بسیار خوب	۳۹۳,۲۲	٪۸,۷٤
مجموع		٤٤۹٦,۷۷	٪۱۰۰



شکل ۸. منحنی ROC و مقدار AUC برای مدل FAHP مجموعه داده‌های اعتبارسنجی

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۱



شکل ۹. موقعیت قرارگیری مجموعه چاه‌های اعتبارسنج

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱

ساها (۲۰۱۷) در مطالعه پتانسیل آب زیرزمینی مبتنی بر AHP، مقدار ۷۷٪ = AUC را در منحنی ROC به دست آورد. به‌طور مشابه، دار و همکاران (۲۰۲۱) نیز اعتبار مدل AHP را برای مناطق بالقوه تغذیه آب زیرزمینی در دره کشمیر با مقدار ۷۹٪ = AUC در منحنی ROC به دست آوردند.

تجزیه و تحلیل منحنی ROC نشان داد، بیشتر مکان‌های چاه پرمحصول در کلاس‌های پتانسیل آب زیرزمینی خوب و بسیار خوب مشاهده شده‌اند که نشان می‌دهد مدل‌ها در طبقه‌بندی منطقه موردمطالعه با توجه به مکان‌های چاه عملکرد خوبی داشتند.

جدول ۷. موقعیت قرارگیری چاه برای صحت‌سنجی در نواحی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۱

ردیف	نواحی پتانسیل‌یابی‌شده	موقعیت قرارگیری چاه‌های اعتبارسنج
۱	پتانسیل بسیار ضعیف	۲ حلقه
۲	پتانسیل ضعیف	۱۱ حلقه
۳	پتانسیل متوسط	۱۹ حلقه
٤	پتانسیل خوب	۳۷ حلقه
۵	پتانسیل بسیار خوب	۱۵۳ حلقه
مجموع		۲۲۲ حلقه

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در دهه‌های اخیر با افزایش جمعیت، نیاز به آب سالم و قابل شرب روند صعودی داشته است و منابع آب سطحی نیز با مسائل آلودگی، تغییرات حجمی و کاهش بارندگی و خشک‌سالی روبه‌رو هستند. بهره‌برداری بی‌رویه از این منبع معدنی به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در برخی نقاط منطقه مورد مطالعه منجر شده و درنتیجه مشکل آب در شهر را تشدید کرده است؛ بنابراین برای مدیریت مؤثر و پایدار این منبع طبیعی کمیاب به بررسی‌های دقیق در منطقه مطالعه‌شده نیاز است.

مطالعه حاضر به‌منظور شناسایی و طبقه‌بندی مناطق بالقوه آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی شهر سقز، یکی از حوضه‌های آبریز دریاچه ارومیه، انجام شد. در این مطالعه، رویکرد تحلیل همپوشانی وزنی با استفاده از تکنیک FAHP همراه با GIS و RS با موفقیت به دست آمد. FAHP به‌دلیل انعطاف‌پذیری توابع عضویت فازی به بهبود دقت نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی منجر می‌شود. درمجموع، ١٤ معیار زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هواشناسی، توپوگرافی و محیطی برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی انتخاب و با همپوشانی ترکیب خطی وزن‌دار در محیط ArcGIS Pro، نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی به دست آمد. مقادیر ارتباط فضایی بین داده‌های بهره‌وری آب زیرزمینی و هریک از عوامل مرتبط با استفاده از ۵۱۹ چاه (۷۰ درصد) به‌عنوان مجموعه داده‌های آموزشی و ۲۲۱ (۳۰ درصد) چاه برای

اهداف اعتبارسنجی نیز محاسبه شد. نقشه‌های نهایی پتانسیل آب زیرزمینی براساس طرح طبقه‌بندی شکست طبیعی به چهار کلاس پتانسیل بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و بسیار خوب طبقه‌بندی شدند. نتایج حاصل از این بخش با مطالعات الویس و همکاران (٢٠٢٢) و رادولوویچ و همکاران (٢٠٢٢) مبنی بر دقت فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از معیارهای زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هواشناسی، توپوگرافی و محیطی و طبقه‌بندی آن مطابقت دارد. مزیت پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات داخلی و خارجی، استفاده از ٧٦٦ چشمه به‌عنوان یکی از معیارها مهم پتاسیل یابی منابع آب زیرزمینی است که در آماربرداری دوره‌ای دقیق توسط شرکت آب منطقه کردستان انجام شد؛ البته به‌کارگیری ٥١٨ حلقه چاه به‌عنوان داده‌های آموزشی اعمال شد که درنهایت نشان داد، مدل FAHP با AUC = ٪٨٣,٧ دقت خوبی دارد.

نتایج این پژوهش نشان داد، بیشتر چاه‌های پرمحصول در مناطق با پتانسیل خوب تا بسیار خوب آب زیرزمینی مشاهده شده‌اند که نشان می‌دهد، مدل‌ها در طبقه‌بندی منطقه موردمطالعه با توجه به موقعیت چاه‌ها عملکرد خوبی داشتند. با این پهنه‌بندی مبتنی بر کیفیت، ١٥٢ حلقه چاه (٧٠ درصد) چاه‌های اعتبارسنج موجود در منطقه پتانسیل بسیار خوب و ٣٧ حلقه چاه (١٧ درصد) چاه‌های اعتبارسنج موجود در منطقه پتانسیل خوب حوضه قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل آماری نشان داد، ٨,٧٤ درصد و ١٨,٤٨ درصد از کل مساحت در زیر بسیار خوب و خوب و ٣١,٤٨ درصد و ٣٤,٢٥ درصد به‌ترتیب در منطقه پتانسیل متوسط و ضعیف و ٧,٠٥ درصد در منطقه با پتانسیل بسیار ضعیف قرار دارند. نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی، مناطقی با پتانسیل خوب و بسیار خوب آب زیرزمینی را در مرکز، شمال غربی، شرق، بخش‌های کوچک جنوبی منطقه موردمطالعه نشان می‌دهد. این مناطق با تراکم زیاد زهکشی رودخانه‌ها و همچنین شیب‌های کم و متوسط مشخص‌شده‌اند. این مطلب تأیید می‌کند که در مرکز حوضه واحدهای کربناته و کربناته–آواری به‌دلیل تشکیل درزه و شکاف‌های طویل و عمیق ناشی از شکنندگی سنگ و داشتن قابلیت انحلال و پتانسیل توسعه کارست، امکان افزایش آب زیرزمینی را دارد. مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی ضعیف در بخش شمالی، جنوب شرقی و غرب یافت شدند؛ بااین‌حال، مناطق بالقوه آب زیرزمینی ضعیف عمدتاً به زمین‌های تپه‌ای و

در سکونتگاه‌ها محدود می‌شوند، اما می‌توانند به‌دلیل فعالیت‌های انسانی‌ای باشند که به چشم‌انداز کم منجر می‌شوند. این مناطق با وجود شیب تند، بارندگی کم و واحدهای سنگی کنگلومرا، واحد شیل، کرتاسه، سنگ‌های پرکامبرین و سنگ‌های آذرین مشخص شده‌اند؛ با وجود این، در غیاب داده‌های تغذیه و سراب زیرزمینی و اعتبارسنجی دقیق، روش پیشنهادی ممکن است به‌عنوان تخمین اولیه چشم‌انداز آب زیرزمینی استفاده شود و مناطق بالقوه شناسایی‌شده برای حفر چاه‌های آب باید ترجیح داده شوند.

مطالعه حاضر کمک درخور توجهی به درک پتانسیل مناطق آب زیرزمینی در حوضه آبخیز موردمطالعه داشت که می‌توانند مهندسان، هیدرولوژیست‌ها، تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان منطقه‌ای برای تکمیل مجدد این منبع ارزشمند حیاتی به‌عنوان چارچوب اولیه استفاده کنند. ازآنجاکه رویکرد این مطالعه مبتنی بر شرایط منطقی و ویژگی‌های عمومی بود، با توجه به توسعه سیاست‌ها و سیستم‌های مؤثر برای استفاده صحیح و اکتشاف منابع آب زیرزمینی، به استفاده از استراتژی منسجمی نیز به‌ویژه توسط وزارتخانه‌ها، سازمان‌های دولتی، سازمان‌های غیردولتی و مردم نیاز است.

کتابنامه

۱. حجازی‌زاده، ز.، خسروی، آ.، حسینی، س ا.، رحیمی، ع.، و کربلائی، علیرضا. (۱٤۰۰). پتانسیل‌سنجی مناطق کویری، بیابانی و سواحل مکران به منظور کسب انرژی از خورشید با استفاده از منطق فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی. *فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، *۲۱* (٦۳)، ۱۸–۱.

۲. حسینی، س. ا.، احمدی، ح.، و هوشیار، م. (۱٤۰۰). واکاوی سامانه بارشی مولد سیلاب تیرماه ۱۳۹٤ شهرستان سقز در استان کردستان. *فصلنامه مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، *۱* (۱)، ٤۷–٦٥.

۳. رنجبری، م ر.، واقعی، ر.، و بیگدلی، ب. (۱۳۹۷). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و GIS و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی به روش تحلیل سلسله مراتبی AHP. *هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران*، دانشگاه یزد.

٤. جلالی، س.، صمدی، م.، صـمدی قشـلاقچایی، م.، و کرنـژادی آ.(۱۳۹۵). بررسـی شـاخص هـای مورفومتری در حوزه آبخیز چهل چای استان گلستان با اسـتفاده از GIS. *نشـریه علمـی ترویجـی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی*، *۷*(٤)، ۳۷–٤۸.

٥. علیزاده، ا. (۱۳۸۹). *اصول هیدرولوژی کاربری* (چاپ سی‌ویکم). مشـهد: انتشـارات دانشـگاه امـام رضا (ع).

٦. کردوانی، پ.، موغلی، م.، و فرخی، ح. (۱۳۹۱). ارزیابی سـد خـاکی لـاور بـر آب‌هـای زیرزمینـی دشت لاور فین (بندرعباس)، *فصلنامه جغرافیایی طبیعی*، *٥*(۱٥)، ۱–۹.

۷. گودرزی، م.، احمدی، ح.، و حسینی، س ا. (۱۳۹٦). بررسی ارتباط شاخص‌هـای پیونـد از دور بـا مؤلفه‌های بارشی و دمایی (مطالعه موردی: ایستگاه همدید کرج). *فصـلنامه اکوهیـدرولوژی*، *٤*(۳)، ٦٤۱–٦٥۱.

۸. ماه گلی، آ.، چیت‌سـازان م.، و میرزایـی، ی. (۱۳۹۰). پتانسـیل‌یـابی آب زیرزمینـی در سـازندهای سخت با استفاده GIS و سنجش از دور (مطالعـه مـوردی: شـمال حسـینه). *همـایش ژئوماتیـک*، سازمان نقشه برداری کشور، تهران.

9. Adeyeye, O. A., Ikpokonte, E. A., & Arabi, S. A. (2019). GIS-based groundwater potential mapping within Dengi area, North Central Nigeria. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *22*(2), 175-181.
10. Al-Ruzouq, R., Shanableh, A., Yilmaz, A. G., Idris, A., Mukherjee, S., Khalil, M. A., & Gibril, M. B. A. (2019). Dam site suitability mapping and analysis using an integrated GIS and machine learning approach. *Water*, *11*(9), 1880.
11. Al-Saady, Y. I., Al-Suhail, Q. A., Al-Tawash, B. S., & Othman, A. A. (2016). Drainage network extraction and morphometric analysis using remote sensing and GIS mapping techniques (Lesser Zab River Basin, Iraq and Iran). *Environmental Earth Sciences*, *75*(18), 1-23.
12. Arefin, R. (2020). Groundwater potential zone identification using an analytic hierarchy process in Dhaka City, Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, *79*(11), 1-16.
13. Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones: A case study from southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, *9*(1), 1-17.
14. Balezentiene, L., Streimikiene, D., & Balezentis, T. (2013). Fuzzy decision support methodology for sustainable energy crop selection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *17*, 83-93.
15. Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, *17*(3), 233-247.

16. Çelik, R. (2019). Evaluation of groundwater potential by GIS-based multicriteria decision making as a spatial prediction tool: Case study in the Tigris River Batman-Hasankeyf Sub-Basin, Turkey. *Water*, *11*(12), 2630.
17. Chen, V. Y., Lien, H. P., Liu, C. H., Liou, J. J., Tzeng, G. H., & Yang, L. S. (2011). Fuzzy MCDM approach for selecting the best environment-watershed plan. *Applied Soft Computing*, *11*(1), 265-275.
18. Chen, W. P., & Lee, C. H. (2003). Estimating ground-water recharge from streamflow records. *Environmental Geology*, *44*(3), 257-265.
19. Chen, W., Zhao, X., Tsangaratos, P., Shahabi, H., Ilia, I., Xue, W., & Ahmad, B. B. (2020). Evaluating the usage of tree-based ensemble methods in groundwater spring potential mapping. *Journal of Hydrology*, *583*, 124602.
20. Chowdhury, A., Jha, M. K., & Chowdary, V. M. (2010). Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. *Environmental Earth Sciences*, *59*(6), 1209-1222.
21. Costanzo, D., Rotigliano, E., Irigaray, C., Jiménez-Perálvarez, J. D., & Chacón, J. (2012). Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: Application to the river Beiro basin (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *12*(2), 327-340.
22. Dar, T., Rai, N., & Bhat, A. (2021). Delineation of potential groundwater recharge zones using analytical hierarchy process (AHP). *Geology, Ecology, and Landscapes*, *5*(4), 292-307.
23. Das, S. (2017). Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain in Gangajalghati block, Bankura district, India using remote sensing and GIS techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, *3*(4), 1589-1599.
24. Das, S. (2019). Comparison among influencing factor, frequency ratio, and analytical hierarchy process techniques for groundwater potential zonation in Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Groundwater for Sustainable Development*, *8*, 617-629.
25. Das, S., & Pardeshi, S. D. (2018). Morphometric analysis of Vaitarna and Ulhas river basins, Maharashtra, India: using geospatial techniques. *Applied Water Science*, *8*(6), 1-11.
26. Deng, F., Deng, Z., Lv, D., Wang, D., Duan, H., & Xing, Z. (2016). Application of remote sensing and GIS analysis in groundwater potential estimation in west Liaoning Province, China. *Journal of Engineering Research*, *4*(3), 1-17.
27. Eini, M., Kaboli, H. S., Rashidian, M., & Hedayat, H. (2020). Hazard and vulnerability in urban flood risk mapping: Machine learning techniques and considering the role of urban districts. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *50*, 101687.
28. Eliades, M., Bruggeman, A., Lubczynski, M. W., Christou, A., Camera, C., & Djuma, H. (2018). The water balance components of Mediterranean pine trees

on a steep mountain slope during two hydrologically contrasting years. *Journal of Hydrology*, *562*, 712-724.

29. Elvis, B. W. W., Arsène, M., Théophile, N. M., Bruno, K. M. E., & Olivier, O. A. (2022). Integration of shannon entropy (SE), frequency ratio (FR) and analytical hierarchy process (AHP) in GIS for suitable groundwater potential zones targeting in the Yoyo river basin, Méiganga area, Adamawa Cameroon. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *39*, 100997.
30. Feizizadeh, B., Roodposhti, M. S., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers & Geosciences*, *73*, 208-221.
31. Gorsevski, P. V., & Jankowski, P. (2010). An optimized solution of multi-criteria evaluation analysis of landslide susceptibility using fuzzy sets and Kalman filter. *Computers & Geosciences*, *36*(8), 1005-1020.
32. Halder, S., Roy, M. B., & Roy, P. K. (2020). Fuzzy logic algorithm based analytic hierarchy process for delineation of groundwater potential zones in complex topography. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(13), 1-22.
33. Haque, M., Siddika, S., Sresto, M. A., Saroar, M., & Shabab, K. R. (2021). Geo-spatial analysis for flash flood susceptibility mapping in the North-East Haor (Wetland) Region in Bangladesh. *Earth Systems and Environment*, *5*(2), 365-384.
34. Hong, H., Tsangaratos, P., Ilia, I., Liu, J., Zhu, A. X., & Chen, W. (2018). Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. *Science of the Total Environment*, *625*, 575-588.
35. Hsieh, T. Y., Lu, S. T., & Tzeng, G. H. (2004). Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. *International Journal of Project Management*, *22*(7), 573-584.
36. Huajie, D., Zhengdong, D., & Feifan, D. (2016). Classification of groundwater potential in Chaoyang area based on QUEST algorithm. In *2016 IEEE international geoscience and remote sensing symposium* (IGARSS) (pp. 890-893). New York: IEEE.
37. Jaafarzadeh, M. S., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R., & Rouhani, H. (2021). Groundwater recharge potential zonation using an ensemble of machine learning and bivariate statistical models. *Scientific Reports*, 11(1), 1-18.
38. Kahraman, C., & Kaya, İ. (2010). Investment analyses using fuzzy probability concept. *Technological and Economic Development of Economy*, *16*(1), 43-57.
39. Kaliraj, S., Chandrasekar, N., & Magesh, N. S. (2014). Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences*, *7*(4), 1385-1401.
40. Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., & Nasseri, M. (2019). A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged

regions based on GIS-based hybrid multi criteria decision-making method. *Journal of Hydrology*, *572*, 17-31.

41. Kayastha, P., Dhital, M. R., & De Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, *52*, 398-408.
42. Li, S. P., & Will, B. F. (2005). A fuzzy logic system for visual evaluation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *32*(2), 293-304.
43. Machiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2011). Assessment of groundwater potential in a semi-arid region of India using remote sensing, GIS and MCDM techniques. *Water Resources Management*, *25*(5), 1359-1386.
44. Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. New York, (Vol. 1). Cham: Springer.
45. Mallast, U., Gloaguen, R., Geyer, S., Rödiger, T., & Siebert, C. (2011). Semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data and the derivation of groundwater flow-paths. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, *15*(8), 2665–2678.
46. Mallick, J., Singh, C. K., Al-Wadi, H., Ahmed, M., Rahman, A., Shashtri, S., & Mukherjee, S. (2015). Geospatial and geostatistical approach for groundwater potential zone delineation. *Hydrological Processes*, *29*(3), 395-418.
47. Manap, M. A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W. N. A., & Ramli, M. F. (2014). Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, *7*(2), 711-724.
48. Moghaddam, D. D., Rezaei, M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghie, Z. S., & Pradhan, B. (2015). Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences, 8*(2), 913-929.
49. Murthy, K. S. R., & Mamo, A. G. (2009). Multi-criteria decision evaluation in groundwater zones identification in Moyale-Teltele subbasin, South Ethiopia. *International Journal of Remote Sensing*, *30*(11), 2729-2740.
50. Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S., & Rezaei, A. (2015). Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon’s entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Earth Science Informatics*, *8*(1), 171-186.
51. Ogato, G. S., Bantider, A., Abebe, K., & Geneletti, D. (2020). Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *27*, 100659.

52. Oh, H. J., & Pradhan, B. (2011). Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. *Computers & Geosciences*, *37*(9), 1264-1276.
53. Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2003). Defuzzification within a multicriteria decision model. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, *11*(5), 635-652.
54. Paksoy, T., Pehlivan, N. Y., & Kahraman, C. (2012). Organizational strategy development in distribution channel management using fuzzy AHP and hierarchical fuzzy TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, *39*(3), 2822-2841.
55. Pathak, D. (2017). Delineation of groundwater potential zone in the Indo-gangetic plain through GIS analysis. *Journal of Institute of Science and Technology*, *22*(1), 104-109.
56. Patra, S., Mishra, P., & Mahapatra, S. C. (2018). Delineation of groundwater potential zone for sustainable development: A case study from Ganga Alluvial Plain covering Hooghly district of India using remote sensing, geographic information system and analytic hierarchy process. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 2485-2502.
57. Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, *51*, 350-365.
58. Radulović, M., Brdar, S., Mesaroš, M., Lukić, T., Savić, S., Basarin, B., & Pavić, D. (2022). Assessment of Groundwater Potential Zones Using GIS and Fuzzy AHP Techniques—A Case Study of the Titel Municipality (Northern Serbia). *International Journal of Geo-Information*, *11*(4), 257.
59. Rahaman, S. A., Ajeez, S. A., Aruchamy, S., & Jegankumar, R. (2015). Prioritization of sub watershed based on morphometric characteristics using fuzzy analytical hierarchy process and geographical information system–A study of Kallar Watershed, Tamil Nadu. *Aquatic Procedia*, *4*, 1322-1330.
60. Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahdavi, M., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, *8*(9), 7059-7071.
61. Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., & Akgun, A. (2014). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, *7*(2), 725-742.
62. Saha, S. (2017). Groundwater potential mapping using analytical hierarchical process: a study on Md. Bazar Block of Birbhum District, West Bengal. *Spatial Information Research*, *25*(4), 615-626.

63. Sajil Kumar, P. J., Elango, L., & Schneider, M. (2022). GIS and AHP Based Groundwater Potential Zones Delineation in Chennai River Basin (CRB), India. *Sustainability*, *14*(3), 1830.
64. Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, *7*(1), 115-124.
65. Silwal, C. B., & Pathak, D. (2018). Review on practices and state of the art methods on delineation of ground water potential using GIS and remote sensing. *Bulletin of the Department of Geology*, *20*, 7-20.
66. Singh, L. K., Jha, M. K., & Chowdary, V. M. (2017). Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 1436-1456.
67. Suganthi, S., Elango, L., & Subramanian, S. K. (2013). Groundwater potential zonation by Remote Sensing and GIS techniques and its relation to the Groundwater level in the Coastal part of the Arani and Koratalai River Basin, Southern India. *Earth Sciences Research Journal*, *17*(2), 87-95.
68. Trabelsi, F., Lee, S., Khlifi, S., & Arfaoui, A. (2018). Frequency ratio model for mapping groundwater potential zones using GIS and remote sensing; Medjerda Watershed Tunisia. *Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences* (CAJG-1), Tunisia.
69. Wang, W. D., Xie, C. M., & Du, X. G. (2009). Landslides susceptibility mapping in Guizhou province based on fuzzy theory. *Mining Science and Technology (China)*, *19*(3), 399-404.
70. Yeh, H. F., Cheng, Y. S., Lin, H. I., & Lee, C. H. (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*, *26*(1), 33-43.